Die

Wechselstromtechnik.

Herausgegeben

von

E. Arnold,

Professor und Direktor des Elektrotechnischen Instituts
der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe.

Dritter Band.

Die Wicklungen der Wechselstrommaschinen

von

E. Arnold.

Mit 426 in den Text gedruckten Figuren.

Berlin.
Verlag von Julius Springer.
1904.

Die Wicklungen

der

Wechselstrommaschinen.

Von

E. Arnold,

Professor und Direktor des Elektrotechnischen Instituts
der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe.

Mit 426 in den Text gedruckten Figuren.

Berlin.
Verlag von Julius Springer.
1904.

Vorwort.

In der elektrotechnischen Literatur fehlte bisher eine systematische Darstellung der Theorie und der Konstruktion der Wechselstromwicklungen, obwohl diese Wicklungen mannigfaltiger sind als die Gleichstromwicklungen, denn sie enthalten die letzteren in sich.

Bei der Behandlung des Stoffes wurde ich durch den Umfang, den er annahm, überrascht und kam infolgedessen zu dem Entschlusse, für die Wechselstromwicklungen einen besonderen Band der Wechselstromtechnik vorzusehen. Es ist dadurch nicht nur eine einheitliche, sondern auch eine bessere und ausführlichere Darstellung erreicht worden, als es bei Verteilung des Stoffes auf andere Bände möglich gewesen wäre.

Insbesondere möchte ich auf die Anwendung der Reihenparallelschaltung mit Äquipotentialverbindungen bei Umformern, auf die ausführliche Behandlung der aufgeschnittenen Gleichstromwicklungen, auf die bisher nicht bekannten abgeänderten Gleichstromwicklungen, ferner auf die Wicklungen für große Stromstärken und die Wicklungen für asynchrone Motoren mit Polumschaltung, die ebenfalls zum Teil neu sind, hinweisen.

Im Anschluß an die in den ersten Kapiteln gegebene schematische Darstellung wird die Konstruktion der verschiedenartigen Wicklungen durch Beispiele erläutert. Den hierbei genannten Firmen, die mir in liebenswürdigster Weise wertvolles Material zur Verfügung stellten, danke ich auch an dieser Stelle bestens.

Die Berechnung der Feldkurve und der in einer Wicklung induzierten EMK, sowie der Einfluß der Polschuhform und der Wicklung auf die Kurvenform der EMK werden in den letzten Kapiteln behandelt. Die gegebenen Tabellen haben den Zweck,

die Rechnungen zu erleichtern, sie sollen aber auch über die besonderen Eigenschaften und den Wert einer Wicklung Aufschluß geben.

Bei der Bearbeitung und Drucklegung des vorliegenden Bandes haben mich die Herren Ing. J. L. la Cour und Dr. ing. M. Kahn Assistenten am Elektrotechnischen Institut, unterstützt. Ich spreche diesen Herren für ihre wertvolle Mitarbeit meinen besten Dank aus.

Karlsruhe, den 25. Februar 1904.

E. Arnold.

Inhaltsverzeichnis.

Erstes Kapitel.

Einleitung.

Zweites Kapitel.

Gewöhnliche Wechselstromwicklungen.

Drittes Kapitel.

Die unveränderlichen Gleichstromwicklungen.

Viertes Kapitel.

Die aufgeschnittenen Gleichstromwicklungen.

Fünftes Kapitel.

Die abgeänderten Gleichstromwicklungen.

Sechstes Kapitel.

Wechselstromwicklungen für große Stromstärken.

Siebentes Kapitel.

Besondere Wicklungen für asynchrone Maschinen.

Achtes Kapitel.

Die Isoliermaterialien.

Neuntes Kapitel.

Anordnung und Isolierung einer Wicklung.

Zehntes Kapitel.

Praktische Ausführung der Wicklungen.

Elftes Kapitel.

Die Feldkurve einer synchronen Maschine.

Zwölftes Kapitel.

Seite

Die in der Wicklung einer Synchronmaschine induzierte EMK.

Dreizehntes Kapitel.

Die Feldkurve einer asynchronen Maschine.

Vierzehntes Kapitel.

Die in der Statorwicklung einer Asynchronmaschine induzierten EMKe.

Anhang.

Erstes Kapitel.

Einleitung.

1. Die Erzeugung eines Wechselstromes.

Ändert der magnetische Kraftfluß, der die Fläche einer Drahtspule durchdringt, seine Richtung und Stärke oder nur seine Stärke in periodischer Weise, so wird in der Spule eine EMK von wechselnder Richtung induziert. Ist die Drahtspule in sich geschlossen oder gehört sie einem geschlossenen Stromkreise an, so entsteht in ihr ein Wechselstrom. —

Die periodische Änderung des Kraftflusses kann auf verschiedene Art erreicht werden; am einfachsten durch die Drehung von Drahtspulen im magnetischen Felde oder die Drehung von magnetischen Polen vor der Fläche der Drahtspulen.

Ein Wechselstromgenerator besteht somit aus einem induzierenden Teil, dem Magnetsystem (Induktor), dessen Pole durch Gleichstrom erregt werden, und einem induzierten Teil, dem Anker (Armatur), der die Spulen oder die Wicklung trägt. Der eine Teil wird ruhend und der andere Teil drehend angeordnet.

Das Magnetsystem wird so ausgeführt, daß in der Drehrichtung entweder abwechselnd ungleichnamige Pole oder nur gleichnamige Pole aufeinander folgen. Die erste Anordnung wird als wechselpolig bezeichnet; die Induktion einer EMK erfolgt hierbei durch Änderung der Stärke und Richtung des Kraftflusses. Die zweite Anordnung heißt man gleichpolig; die Induktion erfolgt hierbei nur durch die Änderung der Stärke des Kraftflusses einer Windung.

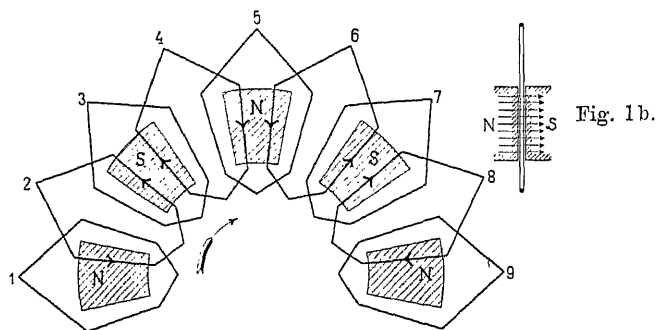
Die momentane Richtung der induzierten EMK läßt sich in jedem Falle mit Hilfe der Faradayschen Schwimmregel oder der sog. Handregel bestimmen. Die letztere lautet:

Man denkt sich die **rechte** *Hand so im magnetischen Felde liegend, daß der* ***F**luß senkrecht durch die* ***F**läche der Hand eintritt und der* ***D**aumen die* ***D**rehrichtung angibt, dann zeigt der Zeigefinger die Richtung der EMK an.* —

Für die Generatoren kann man auch folgende bequemere Regel benützen:

Stellt man sich vor den Generator, so tritt bei **Rechtsdrehung** *des* **inneren** *Teiles* (s. Fig. 1) *oder bei Linksdrehung des äußeren Teiles, gleichgültig ob Anker oder Magnetsystem rotiert, der Strom vor dem* ***Süd**pol au**S** und vor dem* ***Nord**pol ei**N**.* —

a) **Wechselpolige Anordnungen.**

Fig. 1a. Fig. 1b.

In Fig. 1a ist die eine Hälfte einer achtpoligen Anordnung aufgezeichnet. Den durch Schraffur bezeichneten Polflächen stehen, wie Fig. 1b als Querschnitt zeigt, ebensolche Flächen entgegengesetzter Polarität gegenüber. Zwischen diesen Polen bewegt sich rechtsdrehend eine Drahtwindung, die nach obiger Regel als der innere Teil der Maschine anzusehen ist.

Für verschiedene, mit 1 bis 9 bezeichneten Lagen der Windung ist die Richtung der induzierten EMK eingezeichnet. In den Lagen 1, 3, 5, 7, für welche der Kraftfluß Φ, der in die Fläche der Windung eintritt, ein Maximum und seine zeitliche Änderung $d\,\Phi$ gleich Null ist, wird die EMK Null und es findet ein Richtungswechsel statt, und in den Lagen 2, 4, 6, 8, wenn die algebraische Summe des positiven und negativen Kraftflusses Null und die zeitliche Änderung $d\,\Phi$ ein Maximum ist, ist die EMK ebenfalls ein Maximum.

Der Verlauf der EMK als Funktion der Zeit, läßt sich bei gleichförmiger Geschwindigkeit der Windung, als eine Wellenlinie,

Fig. 2, darstellen. Die Form der Wellenlinie hängt von der Gestalt der Polflächen und der Form und Breite der Spulen ab.

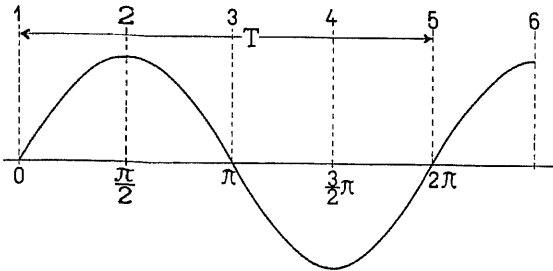



Fig. 2.

Ist $2p$ die Polzahl und n die Zahl der Umdrehungen pro Minute, so ist die Zahl der Richtungswechsel pro Sekunde $\frac{2pn}{60}$ und die Zahl der Perioden c von der Zeitdauer T

$$c = \frac{p \cdot n}{60} \text{ und } c = \frac{1}{T}.$$

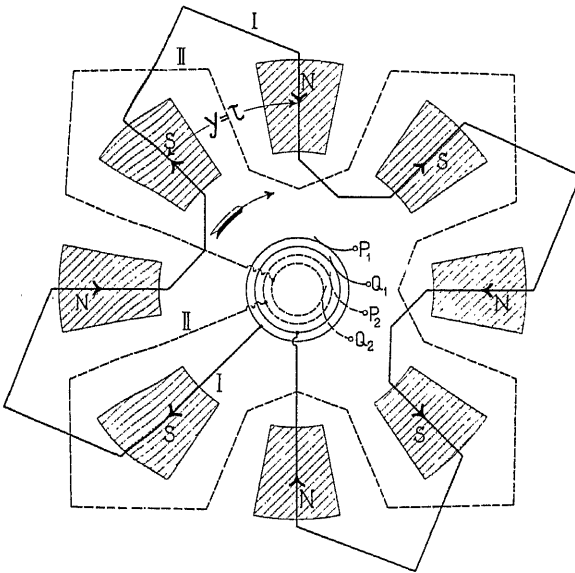



Fig. 3.

Macht man die Weite y einer Windung gleich der Polteilung τ und schaltet $2p$ Windungen, die gleiche Lage relativ zu den Polen haben, hintereinander, so entsteht die Wicklung Fig. 3, man be-

zeichnet sie als **Wellenwicklung** oder als **umlaufende Wicklung**. Die punktierte Lage entspricht dem Momente des Richtungswechsels der EMK. Die Enden der Wicklung sind mit Schleifringen verbunden, von denen der Wechselstrom durch Bürsten *P*, *Q* abgeleitet werden kann. (Der Zweck des zweiten Paares der Schleifringe wird später erläutert.)

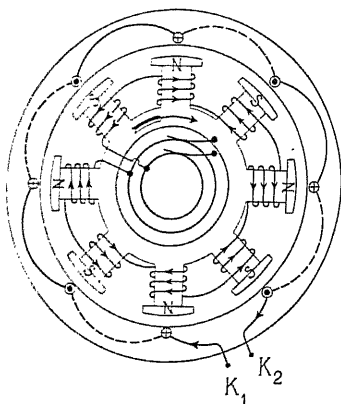



Fig. 4.

Die am meisten gebräuchliche wechselpolige Anordnung ist in Fig. 4 dargestellt. Das Magnetsystem dreht sich im Innern des ruhenden zylindrischen Ankers und der Erregerstrom wird der Magnetwicklung durch zwei Schleifringe zugeführt.

Die Ankerleiter, in denen eine EMK induziert wird, erscheinen in der Figur, die eine Vorderansicht darstellt, als Punkte.

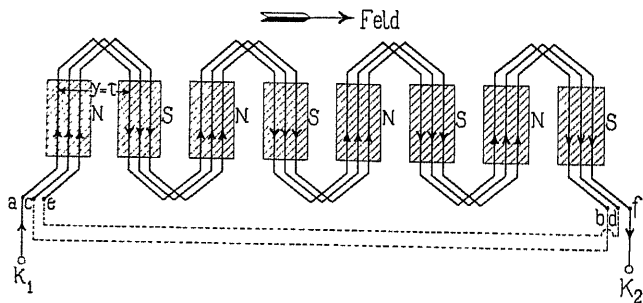



Fig. 5. Einphasige umlaufende Wicklung.

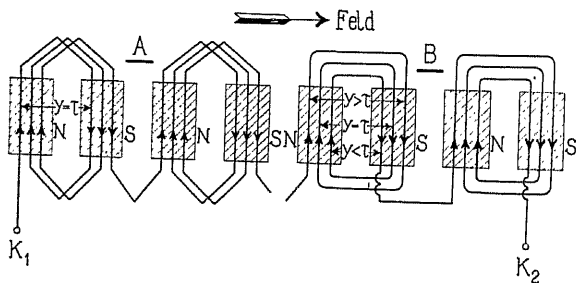



Fig. 6. Einphasige Spulenwicklung.

Denken wir uns den Anker zwischen K_1 und K_2 aufgeschnitten und so in die Papierebene ausgebreitet, daß die Pole unterhalb der

Wicklung liegen, so entsteht Fig. 5. Die Wicklung bildet nun ebenso wie in Fig. 3 einen Wellenzug K_1, *a*, *b*. Anstatt, wie in Fig. 4, nach einem Umgange zur Klemme K_2 zu gehen, können wir die Zahl der Umgänge beliebig vergrößern, indem wir das Ende eines Umganges (*b* und *d*) mit dem Anfange des nächsten (*c* und *e*) verbinden und erst das Ende *f* des letzten Umganges mit K_2 verbinden. Wir erhalten so eine Wicklung mit mehreren Umgängen. Die Entfernung von zwei Drähten, die im Schema aufeinanderfolgen, oder der Wicklungsschritt *y* ist immer gleich der Polteilung τ.

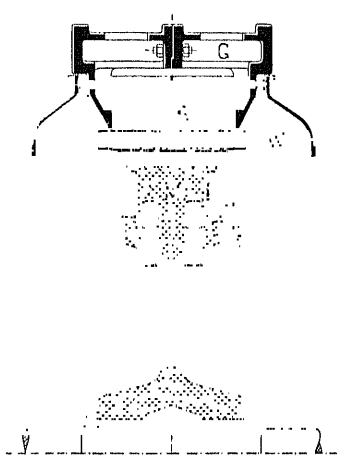
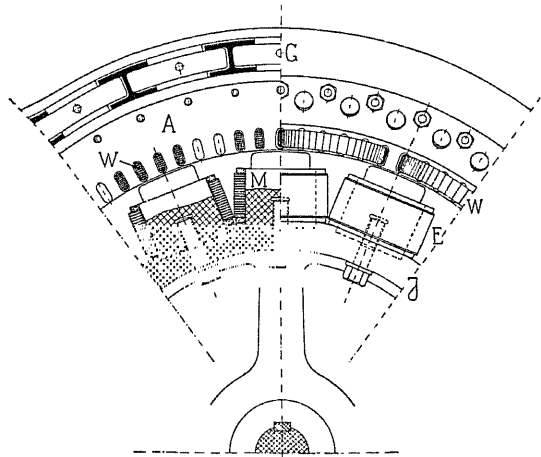



Fig. 7a. Fig. 7b.

Wechselpoliger Einphasengenerator von Brown, Boveri & Co.

Verbindet man die Drähte nach dem Schema *A* und *B*, Fig. 6, so entsteht eine Spulenwicklung. Je 6 Drähte bilden hier eine Spule. Bei der Verbindungsart *A* ist der Wicklungsschritt der Drähte einer Spule immer gleich τ, bei der Verbindungsart *B* gleich, größer und kleiner als τ. —

Die Fig. 7a u. b zeigen den Schnitt durch einen modernen wechselpoligen Generator mit einphasiger Wicklung und innen rotierendem Magnetsystem. *G* ist das Gußgehäuse, *A* das Ankereisen, *M* die Magnetkerne, *J* das Jocheisen, *F* die vom Gleichstrom durchflossene Erregerwicklung und *W* die Ankerwicklung, die hier als Spulenwicklung ausgeführt und in 4 Löchern pro Pol untergebracht ist.

Fig. 8 zeigt die Photographie einer modernen Wechselstrommaschine der Siemens-Schuckert-Werke mit direkt gekuppelter Erregermaschine. Das Polrad rotiert, wie bei der Maschine Fig. 7,

im Innern der Armatur. Die Erregerwicklung besteht aus Kupferband, welches hochkantig gewickelt ist.

Eine Maschinentype mit innen liegender Armatur und außen rotierendem Magnetsystem ist in Fig. 9 abgebildet. Auch hier ist der Erregeranker direkt auf die Welle des Wechselstromgenerators gesetzt. Die Armatur ist auf ein feststehendes Rad aufgebracht, das an der Seite des Lagerbockes befestigt ist. Der obere Teil der Armatur ist aus dem Feld herausgeschoben. Die Anordnung ergibt ein großes Schwungmoment des Magnetrades.

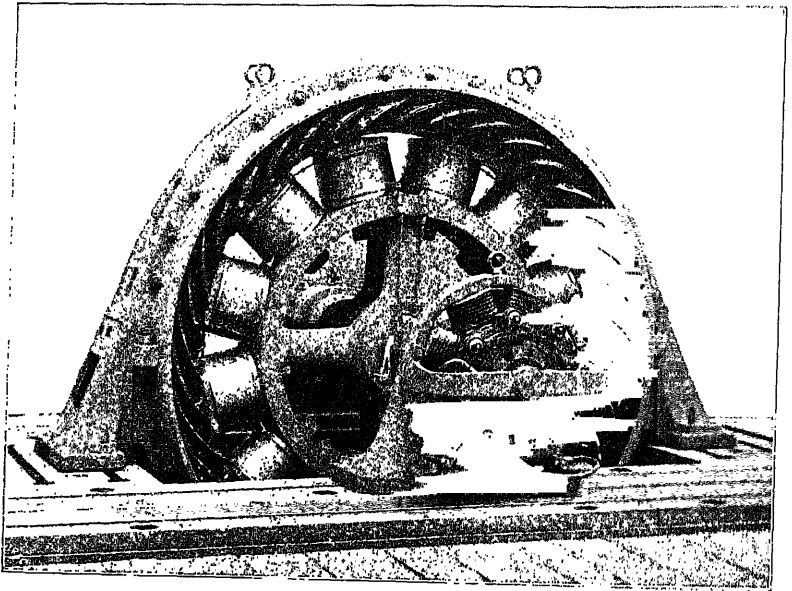



Fig. 8. Generator der Siemens-Schuckertwerke für 810 KW und 500 Umdrehungen. Innenpoltype.

Zur Erzeugung eines Wechselstromes eignet sich jede Gleichstromwicklung. Das läßt sich am einfachsten an der Grammeschen Ringwicklung, Fig. 10, zeigen. Von zwei Windungen des Ankers oder zwei Lamellen a und b, die um eine Polteilung voneinander entfernt sind (180^0 im zweipoligen Schema), führt man Verbindungen zu zwei Schleifringen, von denen nun ein Wechselstrom abgenommen werden kann. In dem Momente, in welchem die Anschlußpunkte a, b in die Verbindungslinie NS fallen, ist die EMK des Wechselstromes Null, und wenn sie in die neutrale Zone $m_1 m_2$ fallen, ein Maximum.

Eine solche Wicklung eignet sich zur gleichzeitigen Erzeugung von Gleichstrom und Wechselstrom. Man kann jedoch der Maschine auch Gleichstrom zuführen und sie als Gleichstrommotor betreiben und Wechselstrom von den Schleifringen abnehmen, oder umgekehrt die Maschine als Wechselstrommotor betreiben und Gleichstrom erzeugen. Die unveränderte Gleichstromwicklung kommt somit hauptsächlich zur Anwendung

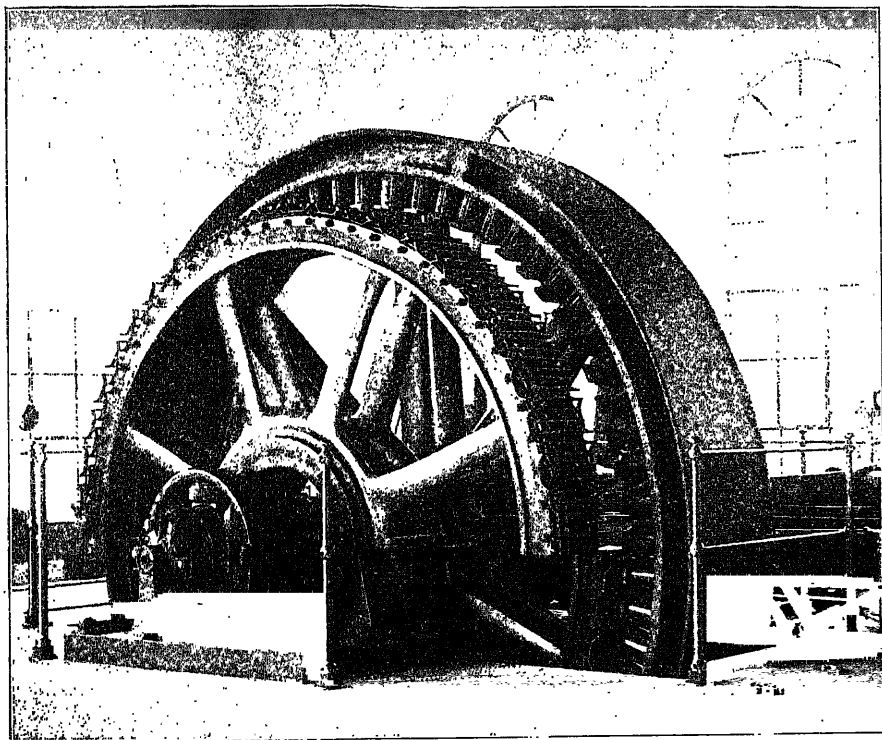



Fig. 9. Generator von Brown, Boveri & Co., Baden. Außenpoltype.

1. bei Doppelstrom-Generatoren,
2. bei Gleichstrom-Wechselstrom-Umformern,
3. bei Wechselstrom-Gleichstrom-Umformern.

Im Falle 2 kann die Maschine noch gleichzeitig als Gleichstrommotor und im Falle 3 als synchroner Wechselstrommotor benutzt werden, indem ein Teil der zugeführten elektrischen Energie in mechanische umgesetzt wird.

Die Gleichstromwicklung unterscheidet sich von der umlaufenden Wicklung (Fig. 5) und der Spulenwicklung (Fig. 6) dadurch, daß sie in sich geschlossen und gleichmäßig über den ganzen Anker

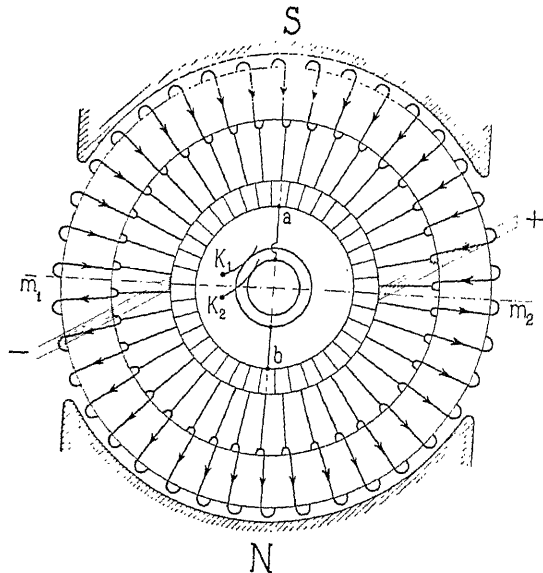



Fig. 10. Unveränderte Gleichstromwicklung.

verteilt ist. Das Schließen der Wicklung hat zur Folge, daß höchstens die Hälfte aller Windungen hintereinander geschaltet werden kann.

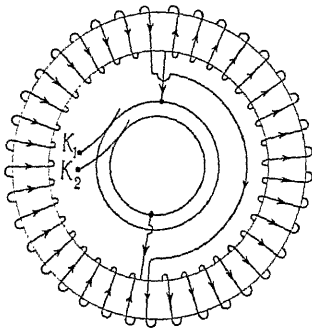



Fig. 11. Aufgelöste Gleichstromwicklung.

Man kann jedoch auch die umlaufende und die Spulenwicklung gleichmäßig am Ankerumfange verteilen und als geschlossene Wicklung ausführen.

Soll eine Maschine mit Gleichstromwicklung nur als Wechselstromgenerator oder Motor dienen, so können alle Windungen hintereinander geschaltet werden, indem man nach dem Schema Fig. 11 verfährt, das eine a u f g e s c h n i t t e n e Gleichstromwicklung darstellt. —

b) Gleichpolige Anordnungen.

Läßt man in Fig. 1a alle Pole derselben Polarität, z. B. alle Südpole fort, so entsteht die gleichpolige Anordnung Fig. 12. Wie

man sieht, tritt der Richtungswechsel der EMK ebenso wie im wechselpoligen Felde in den Lagen 1, 3, 5, 7, 9 einer Spule ein, und die Zahl der Perioden ist daher wie dort $\frac{pn}{60}$, wo p die Zahl der gleichnamigen Pole bedeutet.

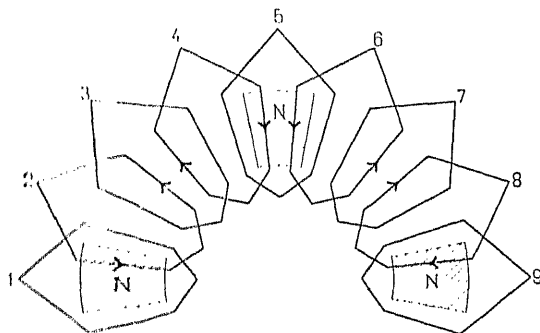



Fig. 12.

Die Wicklungsschema der Figuren 3 bis 6 sind somit ohne weiteres für ein gleichpoliges Feld geeignet, wir haben nur alle *S*- oder alle *N*-Pole zu entfernen.

Denken wir uns in Fig. 4 die vier Südpole in axialer Richtung gegen die vier Nordpole verschoben und für jedes Polsystem einen Anker angeordnet, so entsteht Fig. 13, die also eine Vereinigung von zwei gleichpoligen Anordnungen darstellt. Der Pfad des Kraftflusses ist durch eine punktierte Linie angedeutet.

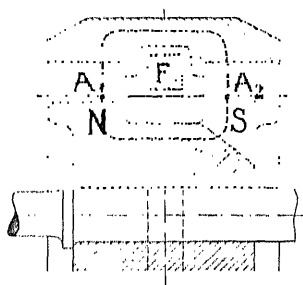



Fig. 13. Gleichpoltype.

Anstatt jeden Pol einzeln zu bewickeln, kann nun eine gemeinsame Erregerspule *F* für beide Polsysteme angeordnet werden. Der gesamte Kraftfluß aller Pole durchdringt jetzt die Fläche dieser Spule, auf der einen Seite liegen die Nordpole und auf der anderen die Südpole.

Die Ankerwicklung kann verschieden ausgeführt werden. Entweder erhält jede Armatur A_1 und A_2, wie in Fig. 15, eine besondere Wicklung, z. B. nach dem Schema Fig. 5 oder 6, die parallel oder hintereinander geschaltet werden, oder beide Armaturen erhalten eine gemeinsame Wicklung. Der letztere Fall ist in Fig. 14 dargestellt.

Man kann sich diese Wicklung aus Fig. 5 einfach durch gegenseitiges Verschieben der ungleichnamigen Pole und ein entsprechendes Verlängern der Ankerwicklung entstanden denken.

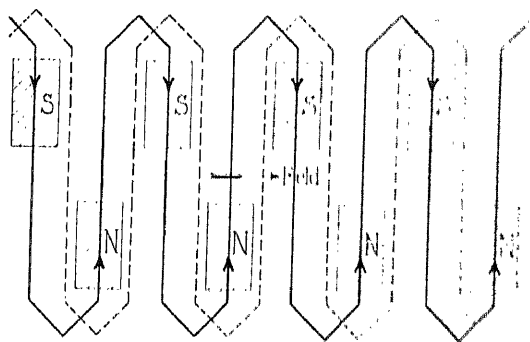



Fig. 14.

Sämtliche Ankerwicklungen einer wechselpoligen Anordnung sind somit auch für eine gleichpolige Anordnung geeignet. Wir wollen daher von jetzt an nur noch die Wicklungen für wechselpolige Magnetsysteme in Betracht ziehen

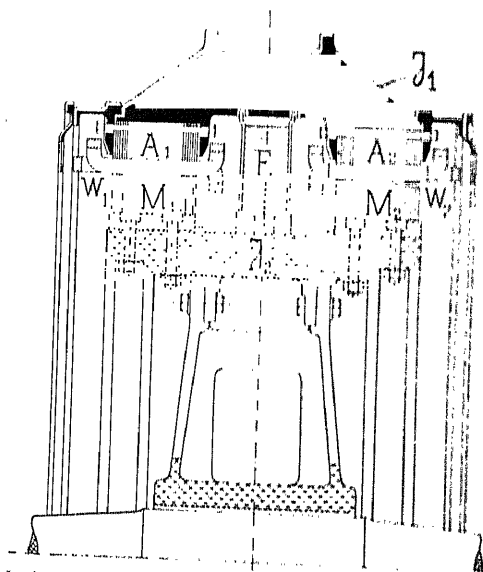



Fig. 15. Schnitt durch eine Gleichpoltype der Maschinenfabrik Orlikon

Fig. 15 zeigt den Schnitt durch einen modernen gleichpoligen Wechselstromgenerator mit einem rotierenden Magnetrad. A_1 und A_2

sind die beiden Ankerkerne, die durch das gußeiserne Joch J_1 miteinander magnetisch verbunden sind. W_1 und W_2 sind die beiden Wechselstromwicklungen, M_1 und M_2 die beiden Systeme von Pol-

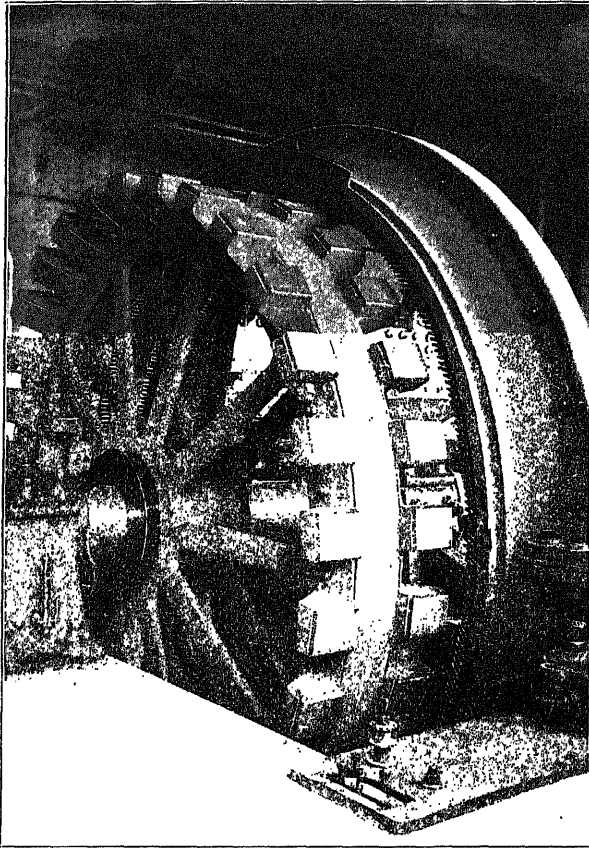



Fig. 16. Gleichpoltype der Maschinenfabrik Örlikon.

hörnern, die durch das gußeiserne Joch J_2 magnetisch verbunden sind. E ist die große vom Gleichstrom durchflossene Erregerspule.

Fig. 16 zeigt die Photographie eines solchen modernen Wechselstromgenerators der Maschinenfabrik Örlikon. Das Magnetrad ist aus dem Ankereisen herausgezogen, wodurch die beiden Reihen von Polhörnern sichtbar geworden sind.

2. Erzeugung eines Mehrphasenstromes.

a) Der Zwei- und Vierphasenstrom. Rotiert in Fig. 3 gleichzeitig mit der Wicklung I eine zweite punktiert gezeichnete Wicklung II, die um eine halbe Polteilung oder (auf ein zweipoliges Schema bezogen) um 90° gegen die erste Wicklung versetzt ist, so ist der Richtungswechsel der EMK und des Stromes der Wicklung II um $\frac{\pi}{2}$ gegen denjenigen von I verschoben, und zwar ve-

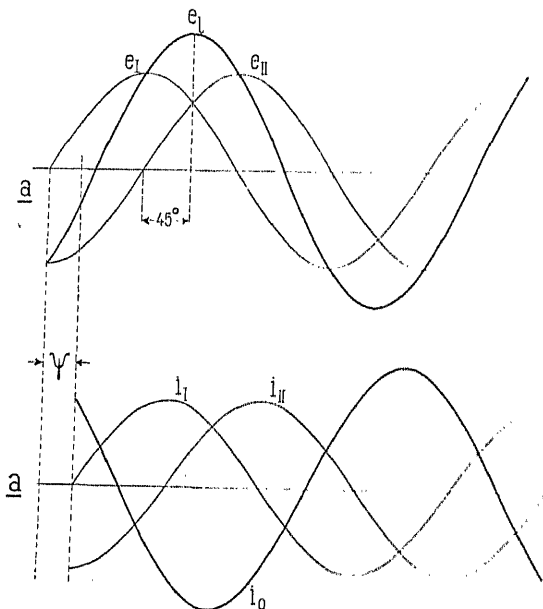



Fig. 17 und 18. Spannungs- und Stromkurven eines Zweiphasensystems.

zögert, wenn II in der Drehrichtung nach I folgt. Der zeitliche Verlauf der phasenverschobenen EMKe ist durch die Wellenlinien e_I und e_{II} in Fig. 17a und der zeitliche Verlauf der Ströme durch Fig. 18a dargestellt.

Die beiden Wicklungen können auf die in den Fig. 19 bis 22 an einer Ringwicklung dargestellten Art mit dem äußeren Stromkreis verbunden werden. Man unterscheidet das unverkettete und das verkettete Zweiphasensystem.

Das unverkettete Zweiphasensystem, Fig. 19, besteht aus zwei ganz getrennten Stromkreisen. Bezeichnen E_p und J_p die effektive Spannung und den effektiven Strom einer Phase, die für beide Phasen I und II als gleich vorausgesetzt werden, so ist

die Linienspannung gleich E_p und der Linienstrom gleich J_p. Die Ströme beider Phasen sind vollkommen unabhängig voneinander. —

Das verkettete Zweiphasensystem zerfällt in das Sternsystem Fig. 20 und 21 und das Ringsystem Fig. 22.

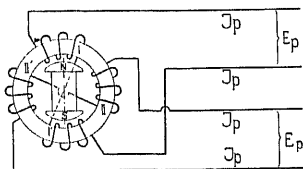



Fig. 19. Unverkettetes Zweiphasensystem.

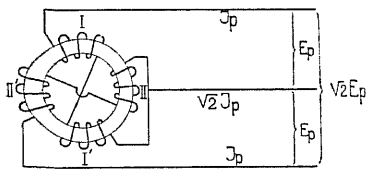



Fig. 20. Verkettetes Zweiphasensystem. Sternschaltung.

In Fig. 20 sind beide Phasen in Serie geschaltet und im Verbindungspunkte ist ein Mittelleiter angelegt; man nennt diese Schaltung auch das Dreileiter-Zweiphasensystem. Die Spannung zwischen Mittelleiter und einem Außenleiter ist gleich der

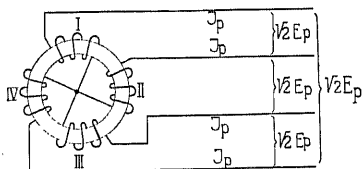



Fig. 21. Verkettetes Zweiphasensystem. Sternschaltung.

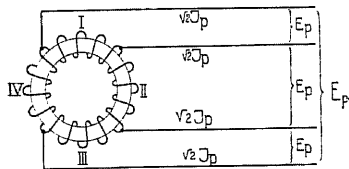



Fig. 22. Verkettetes Zweiphasensystem. Ringschaltung.

Sternspannung oder Phasenspannung E_p und die Spannung zwischen den Außenleitern ist, wie das Vektordiagramm Fig. 17 b ergibt,

$$2 \sin 45^0 \cdot E_p = \sqrt{2} \cdot E_p.$$

Die momentane Stromstärke i_0 im Mittelleiter (Fig. 18a) ist gleich und entgegengesetzt der Summe $i_1 + i_2$ der momentanen Stromstärken der Außenleiter, also $i_1 + i_2 + i_0 = 0$, und der effektive Strom J_0 des Mittelleiters ist

$$2 \sin 45^0 \cdot J_p = \sqrt{2} \cdot J_p.$$

Da die Summe der drei Stromstärken stets Null sein muß, so bilden ihre Amplituden ein geschlossenes Dreieck; denn die Projektionen der Seiten dieses Dreiecks auf eine rotierende Zeitlinie stellen die momentanen Stromstärken dar, und ihre algebraische Summe ist stets Null.

Die Winkel des Dreiecks oder die Phasenwinkel sind von der Verteilung der Belastung auf die zwei Phasen und von der Impedanz des Mittelleiters abhängig. Die Ströme beider Phasen sind daher nicht mehr unabhängig voneinander.

Die Schaltungen Fig. 21 und 22 bezeichnet man als Vierphasensystem oder verkettetes Vierleiter-Zweiphasensystem, und zwar stellt Fig. 21 eine Sternschaltung und Fig. 22 eine Ringschaltung dar.

Für die Sternschaltung ist der Linienstrom gleich dem Phasenstrom J_p und die Spannung zwischen zwei benachbarten Leitern, da wir 90^0 Phasendifferenz haben

$$= 2 \cdot \sin 45^0 \cdot E_p = \sqrt{2} \cdot E_p.$$

Für die Ringschaltung wird der Linienstrom

$$= 2 \cdot \sin 45^0 \cdot J_p = \sqrt{2} \cdot J_p$$

und die Linienspannung gleich der Phasenspannung. —

b) **Der Drei- und Sechsphasenstrom.** Ordnen wir im zweipoligen Felde drei Spulen I, II, III oder drei Spulenpaare I—I',

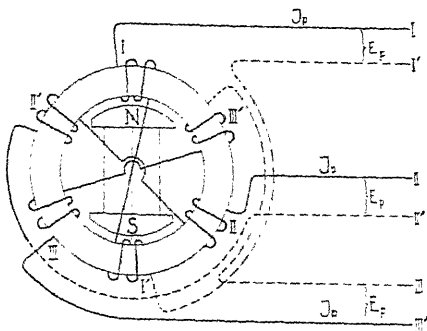
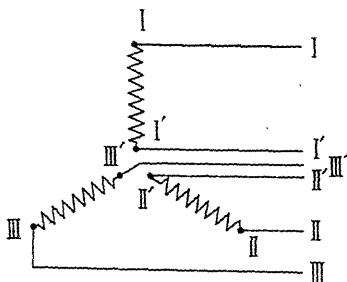



Fig. 23. Fig. 24.

Unverkettetes Dreiphasensystem.

II—II', III—III' unter 120^0 an (Fig. 23 und 24) und sechs Leitungen, so erhalten wir drei Wechselströme mit 120^0 Phasendifferenz, die voneinander vollkommen unabhängig sind. Sind die Stromkreise symmetrisch und gleich belastet, so erhalten wir drei Ströme von gleichem Effektivwert J_p und gleicher effektiver Spannung E_p. Der zeitliche Verlauf der Ströme ist durch Fig. 25 dargestellt; ist er sinusförmig, so ist in jedem Momente die algebraische Summe der Ströme der drei Leiter I, II, III und der drei Leiter I', II', III' gleich Null, d. h.

$$i_I + i_{II} + i_{III} = 0.$$

Vereinigen wir die drei Leiter I', II', III' der Fig. 24 zu einem gemeinsamen Mittelleiter, so entsteht die Sternschaltung mit

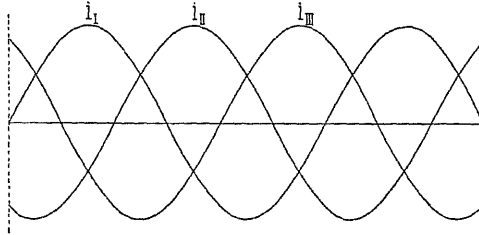



Fig. 25. Stromkurven eines Dreiphasensystems.

Mittelleiter (Fig. 26). Für sinusförmige Ströme und symmetrische Belastung ist die Stromstärke des Mittelleiters Null; er wird jedoch Strom führen, sobald die Belastung der drei Phasen ungleich wird oder die Ströme nicht mehr sinusförmig sind. Die Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Mittelleiter ist gleich der Phasenspannung E_p und die Spannung zwischen zwei Außenleitern entsprechend der geometrischen Zusammensetzung der Spannungen von zwei Phasen unter 120⁰ gleich

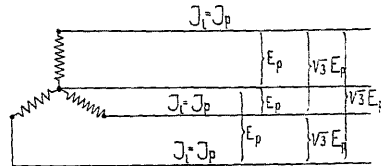
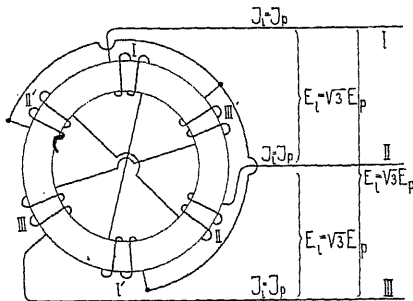
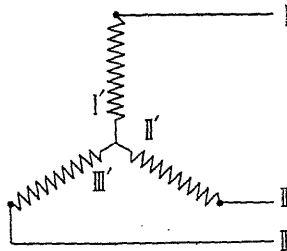



Fig. 26. Sternschaltung eines Dreiphasensystems mit Mittelleiter.

$$2 \sin 60^0 \cdot E_p = \sqrt{3} \cdot E_p.$$

Lassen wir den Mittelleiter fort, so entsteht die Dreiphasen-Sternschaltung (Fig. 27 und 28). In zyklischer Vertauschung

Fig. 27. Fig. 28.

Dreiphasensternschaltung.

kann immer ein Leiter als Rückleiter der beiden übrigen angesehen werden, und es muß in jedem Momente $i_I + i_{II} + i_{III} = 0$

sein, d. h. die Amplituden der drei Stromstärken bilden jederzeit ein geschlossenes Dreieck, wenn wir sie nach Phase und Richtung in einem bestimmten Maßstabe darstellen. Die Ströme sind jetzt nicht mehr unabhängig voneinander, d. h. die Winkel des Dreiecks sind in bestimmter Abhängigkeit von der Belastung der drei Phasen. Ändert man die Belastung einer Phase, so ändern sich auch die Ströme der beiden andern; für symmetrische Belastung ist das Stromdreieck ein gleichseitiges. —

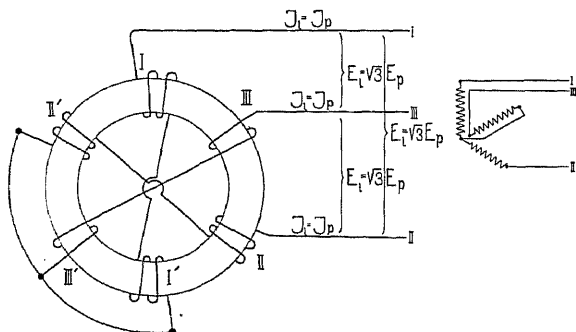



Fig. 29 und 30. Dreiphasen-Sternschaltung.

Kehrt man den Wicklungssinn einer Phase um, wie z. B. der Phase 3 in Fig. 29 und 30, so entspricht das einer Drehung des Stromes um 180°, und die Schaltung ist in der angegebenen Weise abzuändern, damit wir wieder 120° Phasendifferenz erhalten. Die Phase eines Stromes hängt also nicht allein von dem zeitlichen Unterschied der Induktion, sondern auch von seiner Richtung ab.

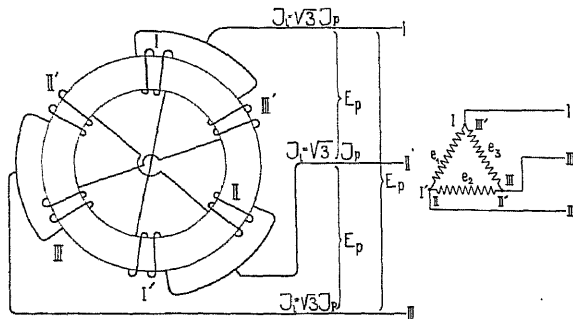



Fig. 31. und 32. Dreiphasen-Dreieckschaltung.

Werden die drei Phasen in Serie geschaltet und die Außenleiter an den Verbindungspunkten angelegt, so entsteht die Dreiphasen-Dreieckschaltung (Fig. 31 und 32). Sind die indu-

zierten EMKe sinusförmig, so verlaufen sie zeitlich wie die Ströme in Fig. 25, und es ist in jedem Momente $e_I + e_{II} + e_{III} = 0$, es können also im Dreieck selbst keine inneren Ströme entstehen. Besitzt jedoch die Kurvenform der EMK höhere Harmonische $3 \cdot n$-facher Ordnung, wo n eine ganze Zahl ist, so sind diese EMKe $3\,n$facher Ordnung in jedem Momente gleichgerichtet (gleichphasig), d. h. es ist ihre Summe $e_{I(3n)} + e_{II(3n)} + e_{III(3n)} = 3 \cdot e_{3n}$, und es entsteht im Dreieck ein innerer Strom, der dieser Summe proportional ist. In Fig. 33 ist die Harmonische von dreifacher Periodenzahl als punktierte Linie eingezeichnet. Die dritten Harmonischen der drei Phasen I, II, III fallen mit der punktierten Linie zusammen, sie sind gleichphasig, und sie addieren sich bei Dreieckschaltung zu einer inneren Spannung $3 \cdot e_3$ von dreifacher Amplitude.

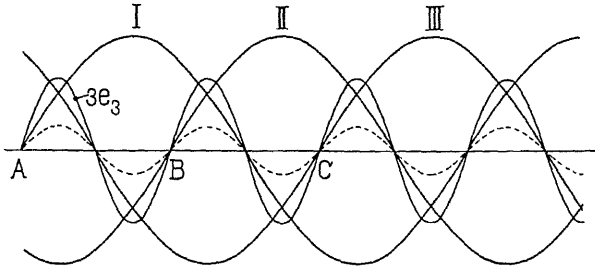



Fig. 33.

Im Dreileiter-Sternsystem (Fig. 28) heben sich dagegen die EMKe $3\,n$-facher Ordnung gegenseitig auf, da sie gleichgroß und gleichzeitig vom neutralen Punkt weg oder auf ihn zu gerichtet sind, d. h. in einem Dreileiter-Sternsystem entstehen keine Ströme $3\,n$-facher Ordnung. Sobald wir jedoch den Mittelleiter nach Fig. 26 hinzufügen, können die Ströme ihren Weg durch den Mittelleiter nehmen. Der Mittelleiter ist daher nur stromlos, wenn bei symmetrischer Belastung keine EMKe in $3\,n$facher Ordnung induziert werden. —

Das Auftreten von EMKen $3\,n$facher Ordnung läßt sich in Generatoren nicht vermeiden, um daher innere Ströme zu verhüten, wird die Sternschaltung der Dreieckschaltung vorgezogen. —

Mit jeder Gleichstromwicklung läßt sich ein Wechselstrom von mehrfacher Phasenzahl erzeugen. Da wir es mit einer geschlossenen Wicklung zu tun haben, erhalten wir Ringschaltung. Liegen die Abzweigungspunkte wie in Fig. 34 um $^2/_3\,\tau$ voneinander entfernt, so entsteht die Dreiphasen-Dreieckschaltung und eine Phase bedeckt am Ankerumfange $^2/_3$ einer Polteilung. —

Sind die Abzweigungspunkte um $^1/_3$ einer Polteilung entfernt, so bedeckt jede Phase nur $^1/_3$ einer Polteilung, und wir erhalten eine (Fig. 35) Sechsphasen-Ringschaltung.

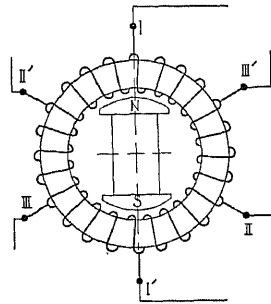
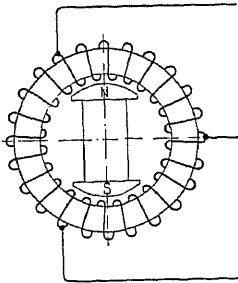



Fig. 34. Dreiphasen-Dreieckschaltung.

Fig. 35. Sechsphasen-Ringschaltung.

Der Phasenwinkel ist jetzt 60°, und der Linienstrom wird

$$2 \sin 30^0 \cdot J_p = J_p$$

die Spannung zwischen zwei benachbarten Leitern ist E_p.

Die Gleichstromwicklung kommt bei Umformern zur Anwendung. Fig. 36 gibt das Wicklungsschema des Ankers eines dreiphasigen zweipoligen Umformers; das Magnetsystem ist feststehend. Drei Lamellen, die um $^2/_3$ der Polteilung entfernt sind, werden mit Schleifringen verbunden. Eine solche Maschine kann

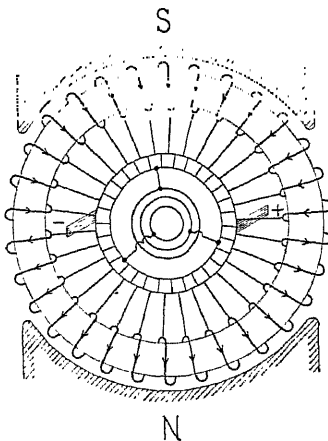



Fig. 36.

1. als Doppelstromgenerator (zur Erzeugung von Gleichstrom und Mehrphasenstrom),
2. als Gleichstrom-Mehrphasenstrom-Umformer und gleichzeitig oder allein als Gleichstrommotor,
3. als Mehrphasenstrom-Gleichstrom-Umformer und gleichzeitig oder allein als Mehrphasenstrom-Synchronmotor

benutzt werden. —

Ein Vierphasen-Umformer erhält vier, ein Sechsphasen-Umformer sechs Schleifringe und Zuleitungen.

Fig. 37 zeigt die Photographie eines Dreiphasenstrom-Gleichstrom-Umformers der A.-G. Brown, Boveri & Co., Baden. Vorne sieht man den Kommutator, hinten sind die drei Schleifringe angeordnet.

Wird die Gleichstromwicklung aufgelöst und verbindet man die Enden aller Phasen an einer Stelle (neutraler Punkt), wie in Fig. 38, so entsteht die Sechsphasen-Sternschaltung.

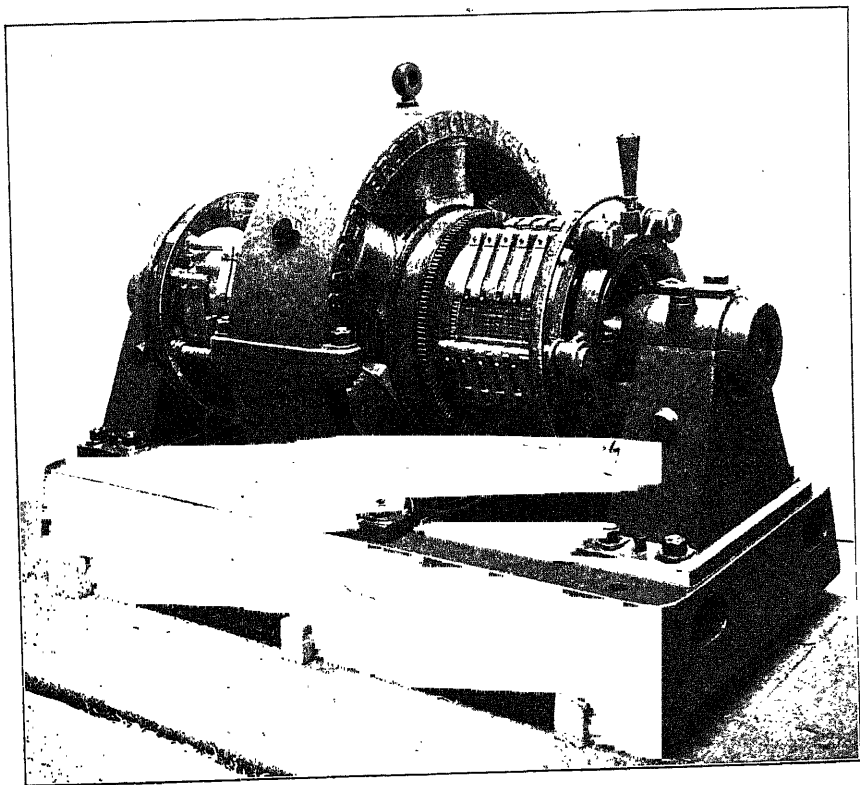



Fig. 37. Dreiphasenstrom-Gleichstrom-Umformer von Brown, Boveri & Co.

Die Spannung zwischen zwei Außenleitern ist allgemein

$$= 2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot E_p,$$

wenn α den Phasenwinkel zwischen den betrachteten Phasen bedeutet. Zwischen zwei benachbarten Außenleitern besteht daher die Spannung

$$2 \cdot \sin 30^0 \cdot E_p = E_p.$$

Der Linienstrom ist gleich dem Phasenstrom.

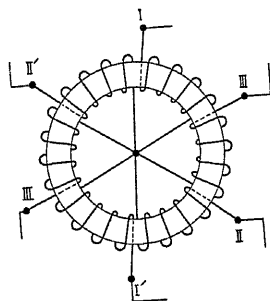



Fig. 38. Sechsphasen-Sternschaltung.

In einem Sechsphasen-Sternsystem heben sich nur die EMKe $6n$facher Ordnung gegenseitig auf. Die EMKe dritter, neunter, fünfzehnter u. s. w. Ordnung haben dagegen in je zwei diametralen Phasen gleiche Richtung. Es fließen daher in drei Phasen, die unter 120° stehen, Ströme dritter, neunter u. s. w. Periodenzahl vom Nullpunkt weg und in den übrigen drei Phasen in entgegengesetzter Richtung.

Bezeichnung	Schema	Phasenzahl
1. Einphasensystem		1
2. Zweiphasensystem unverkettet oder Zweiphasen-Vierleitersystem . . .		2
3. Zweiphasensystem verkettet oder Zweiphasen-Dreileitersystem . . .		2
4. Dreiphasensystem unverkettet oder Dreiphasen-Sechsleitersystem . .		3
5. Dreiphasen-Vierleitersystem . . .		3
6. Dreiphasen-Dreileitersystem mit Sternschaltung		3
7. Dreiphasen-Dreileitersystem mit Ringschaltung oder Dreieckschaltung		3
8. Vierphasen-Sternsystem		4
9. Vierphasen-Ringsystem		4
10. Sechsphasen-Sternsystem		6
11. Sechsphasen-Ringsystem		6

Fig. 38a.

Bezeichnet m die Anzahl der Phasen, so nennt man allgemein eine Schaltung mit $2m$ Außenleitern oder Fernleitungen ein unverkettetes und eine Schaltung mit m oder $(m+1)$ Leitern ein verkettetes Mehrphasensystem.

Die vorstehende Tabelle gibt eine Zusammenstellung der verschiedenen Systeme und ihrer Benennungen.

Die Vier- und Sechsphasensysteme unterscheiden sich von den Zwei- und Dreiphasensystemen nur durch die Verbindungsart der Wicklungen, die gegenseitige Lage der Wicklungen bleibt dieselbe. Wir können uns daher bei der Behandlung der Wicklungen auf die ein-, zwei- und dreiphasigen beschränken.

3. Die synchronen Maschinen und ihre Wicklungen.

Die große technische Bedeutung der Mehrphasenströme beruht auf der von Ferraris und Tesla entdeckten Tatsache, daß sich mit ihnen auf einfachste Weise ein konstantes Drehmoment von einem Generator zu einem Motor übertragen läßt.

In einem Mehrphasengenerator ist das Drehmoment, das zur Erzeugung des Stromes aufgewendet werden muß, konstant, wenn wir effektive Leistung und Winkelgeschwindigkeit als konstant voraussetzen.

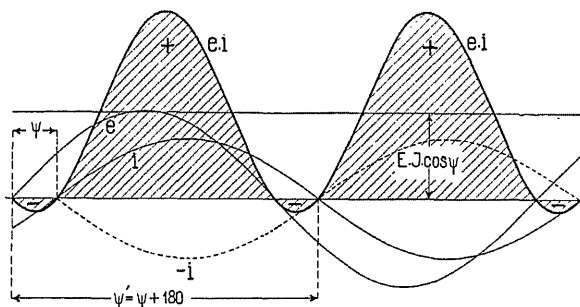



Fig. 39. Leistungskurven eines Einphasensystems.

Wir können uns davon überzeugen, wenn wir die Kurven der momentanen Leistungen, denen das momentane Drehmoment bei konstanter Winkelgeschwindigkeit proportional ist, aufzeichnen.

Wir betrachten zunächst eine Maschine mit einphasiger Wicklung oder nur eine Phase einer Maschine mit mehrphasiger Wicklung.

In Fig. 39 sei e die EMK-Kurve und i die Stromkurve einer Phase, und zwar ist i um den Winkel ψ gegen e verzögert. (Siehe auch Bd. I, Seite 139.) Der Momentanwert ei der Leistung schwankt um

den Mittelwert $EJ \cos \psi$ mit der doppelten Periodenzahl des Stromes hin und her. Sind die Werte von *ei* positiv, so wird die Leistung an den Stromkreis abgegeben, sind sie negativ, so wird die betreffende Leistung vom Stromkreise entnommen. Die Maschine wirkt also zum Teil als Generator, zum Teil als Motor.

Für $\psi = 0$ verschwinden die negativen Werte von *ei* und für $\psi = \pm 90^0$ sind die positiven und negativen Werte einander gleich, für $\psi > 90^0$ überwiegen die negativen Werte und für $\psi = 180^0$ sind keine positiven, sondern nur negative Werte vorhanden. (Siehe Bd. I, Seite 19.)

Es ist somit für $\psi = -90^0$ (oder 270^0) bis $+90^0$ $W = -EJ \cos \psi$ negativ und die Maschine ein Generator, und für

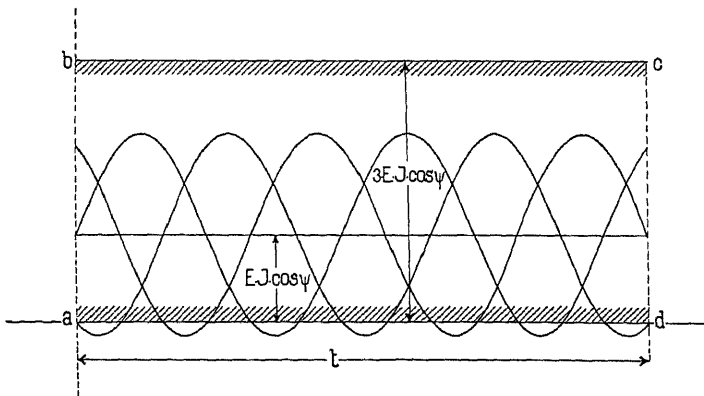



Fig. 40. Leistungskurven eines Dreiphasensystems.

$\psi = 90^0$ bis 270^0 $W_1 = -EJ \cos \psi$ positiv und die Maschine ein Motor.

Haben wir nun zum Beispiel eine Maschine mit dreiphasiger Wicklung, so finden wir die momentanen Leistungen, wenn wir die Ordinaten von drei Leistungskurven der Fig. 39, die um $^2/_3$ einer Periode des Wechselstromes gegeneinander verschoben sind, addieren. Wir erhalten dann als Leistungskurve die Gerade *bc*, Fig. 40. Das Drehmoment ist somit ganz konstant.

Denken wir in Fig. 39 die Stromkurve um 180^0 verschoben oder was dasselbe ist, den Strom umgekehrt in die Wicklung fließend, so wechseln die momentanen Leistungen ihr Vorzeichen, die positiven Flächen werden negativ und die negativen positiv. Die resultierende Leistung der drei Phasen wird ebenfalls positiv und der Dreiphasengenerator zum Dreiphasenmotor.

Wir können nun eine Arbeitsübertragung mit Wechselstrom schematisch darstellen. In Fig. 41 sind *G* und *M* zwei Wechsel-

strommaschinen mit den durch Gleichstrom erregten Magnetsystemen N—S. Die momentane Richtung des Stromes ist entsprechend der angenommenen Drehrichtung für G als Generator eingezeichnet. Schalten wir nun die Wicklung von M mit derjenigen von G hintereinander und rotiert das Magnetsystem in der Pfeilrichtung, so ist die Stromrichtung, die M von G aufgedrückt wird, im Vergleiche zur Richtung in G umgekehrt oder um 180^0 verschoben; die Maschine M wirkt daher als Motor.

Wie ersichtlich, ist die Lage des Magnetsystems von M in bestimmter Abhängigkeit von der Lage des Magnetsystems von G. Bei gleicher Polzahl rotieren beide mit gleicher Tourenzahl, es besteht Synchronismus und M ist ein Synchronmotor.

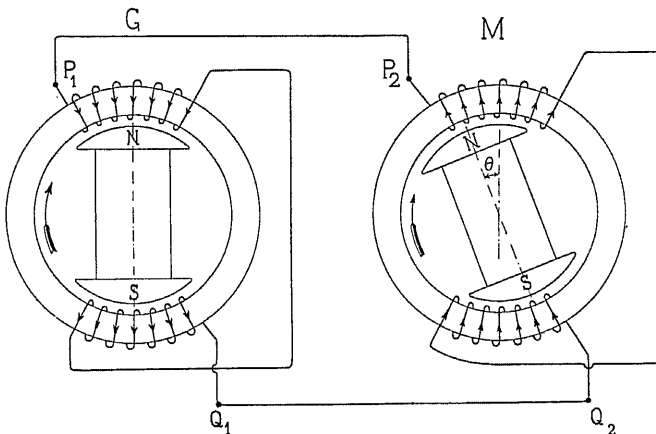



Fig. 41. Einphasengenerator mit Synchronmotor.

Die Verhältnisse der Spannungen und der Phasenverschiebungen lassen sich durch ein Vektordiagramm übersichtlich darstellen. Ist in Fig. 42 $OA = E_g$ die in der Generatorwicklung von Q_1 bis P_1 und $OB = E_m$ die in der Motorwicklung von Q_2 bis P_2 induzierte EMK, so bilden beide Richtungen den Winkel Θ, d. h. die beiden Magnetsysteme sind in Fig. 41 um den Winkel Θ gegeneinander verschoben.

Verfolgt man den Weg des Stromes $P_1 P_2 Q_2 Q_1 P_1$ so sieht man, daß derselbe in der Richtung der EMK E_g des Generators und gegen die EMK E_m des Motors verläuft. In bezug auf Ankerwicklung und Magnetsystem, d. h. räumlich, sind die beiden EMKe E_g und E_m fast in Phase. In bezug auf den geschlossenen elektrischen Stromkreis dagegen sind sie nahezu um 180^0 gegeneinander in Phase verschoben. Diese letztere EMK OB_1 ist die im Motor

induzierte EMK, die auch die **gegenelektromotorische Kraft des Motors** genannt wird. Da die Vektordiagramme möglichst den Charakter eines Potentialdiagrammes erhalten sollen, so werden wir in allen Diagrammen die Vektoren der räumlich induzierten EMKe E_g und E_m abtragen, wir erhalten dann $E_m = OB$ und als resultierende und in dem geschlossenen Stromkreis wirkende EMK

$$E_z = BA.$$

Fig. 42. Vektordiagramm zu Fig. 41.

Bezeichnet r den effektiven Widerstand und x die Reaktanz des gesamten Stromkreises, so ist

$$J = \frac{E_z}{\sqrt{r^2 + x^2}}.$$

Machen wir ferner in dem über E_z beschriebenen Halbkreis $AC = Jr$ gleich dem ohmschen Spannungsverlust, so ist $BC = Jx$ gleich der Reaktanzspannung und es ist die Richtung des Stromes durch AC bestimmt.

Ziehen wir daher durch O den Vektor OJ parallel zu AC, so stellt dieser den Stromvektor dar und ψ_g und ψ_m sind die Phasenverschiebungswinkel von J gegen E_g und E_m. In unserem Falle sind es Verzögerungswinkel.

Die beiden Magnetsysteme bilden räumlich denselben Winkel Θ miteinander wie die räumlich induzierten EMKe E_g und E_m.

Die dem Einphasenmotor zugeführte Leitung ist, wie Fig 39 lehrt, eine stark pulsierende, sie erreicht den Wert Null und wird zeitweise sogar negativ, d. h. der Motor zum Generator. Ein Einphasenmotor kann daher nicht von selbst anlaufen. Um seine Todlagen zu überwinden muß er auf Synchronismus gebracht werden, alsdann halten ihn die zugeführten Leistungsimpulse dauernd im Betrieb.

Die **mittlere Leistung** des Generators ist

$$W_g = -E_g\, J \cos \psi_g$$

und die des Motors ist

$$W_m = - E_m J \cos (\pi + \psi_m) = E_m J \cos \psi_m .$$

In der Formel für die Leistung des Motors ist nämlich der Phasenverschiebungswinkel $(\pi + \psi_m)$ der Winkel zwischen dem Strom und der in bezug auf den Stromkreis induzierten EMK.

Die Verbindung eines Dreiphasengenerators mit einem Dreiphasenmotor veranschaulicht Fig. 43. Der Motor empfängt, wie Fig. 40 lehrt, eine konstante Momentanleistung; das Drehmoment ist für jede Lage des Magnetsystems daher dasselbe. Der Motor hat keine Todlagen und er kann, wie später gezeigt werden soll, bei nicht erregtem oder schwach erregtem Magnetsystem von selbst

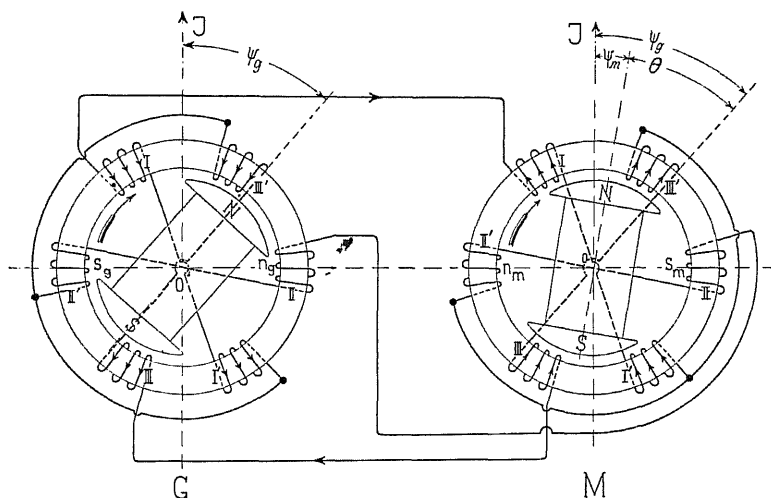



Fig. 43. Dreiphasengenerator mit -Synchronmotor.

anlaufen und den synchronen Gang erreichen. Im Betriebe hat das erregte Magnetsystem des Motors eine bestimmte Lage relativ zum Magnetsystem des Generators entsprechend der Phasenverschiebung Θ der induzierten EMKe von Motor und Generator.

Die beschriebene Anordnung ist somit im Betriebe an den Synchronismus gebunden und M ist ein synchroner Dreiphasenmotor.

Wir können das Entstehen eines Drehmomentes auch durch das Zusammenwirken von zwei Magnetsystemen erklären. Wir gehen hierbei am besten vom Mehrphasensystem und der Erzeugung eines magnetischen Drehfeldes aus.

Bei der in Fig. 43 angenommenen momentanen Lage ist der Strom in den Spulen II—II′ Null, in I—I′ entfernt er sich und

in III—III' nähert er sich dem Maximum. Die Spulen I—I' und III—III' erzeugen im Generator und Motor ein magnetisches Feld, das sog. Ankerfeld, dessen Achse $n-s$ in die Richtung II—II' bezw. II'—II fällt. Verfolgen wir nun die Drehung der Pole N und S im Generator, so wandert das Strommaximum der Spulen synchron mit dieser Drehung in der Richtung I—III'—II—I' u. s. f. und nach je $^1/_6$ Umdrehung bezw. $^1/_6$ Periode tritt wieder ein Strommaximum auf; das gleiche gilt für das Stromminimum Null.

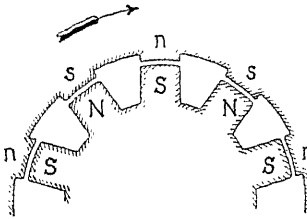



Fig. 44.

Die Pole des Ankerfeldes n—s von Generator und Motor müssen sich daher verschieben und mit derselben Geschwindigkeit, wie die Feldpole drehen, d. h. die Ankerströme erzeugen ein magnetisches mit den Feldpolen synchron rotierendes Feld. Dieses Drehfeld hat eine konstante Stärke und ist relativ zum Magnetsystem in Ruhe. Wenn wir die Pole N—S festhalten und den Anker nach rechts drehen, so wird das Ankerfeld im Raume stillstehen, d. h. sich relativ zum Anker mit gleicher Geschwindigkeit nach links drehen.

In bezug auf Form und Wirkung hat das von dem Mehrphasenstrom erzeugte Drehfeld dieselben Eigenschaften wie ein rotierendes Magnetfeld, das von einem Gleichstrom erzeugt wird.

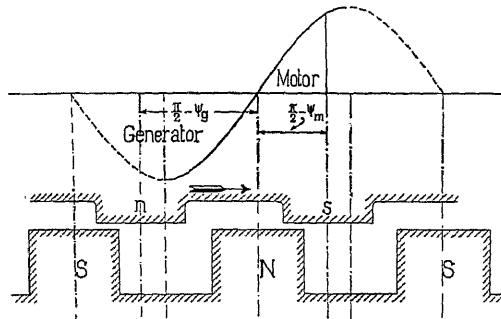



Fig. 45.

Wir können uns deswegen das Drehfeld im Motor durch ein Magnetsystem mit körperlichen Polen ersetzt denken, das mit gleicher Geschwindigkeit rotiert. In Fig. 44 sei dies der äußere Ring, während der innere die wirklichen Feldpole darstellt. Fängt der äußere Kranz langsam zu rotieren an, so werden durch die relative

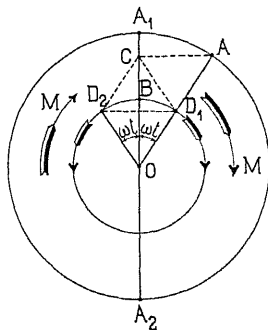
Verschiebung tangentiale Kräfte entstehen und der innere Teil wird mitgenommen werden. Die Größe des ausgeübten Drehmomentes wird bei konstanter Stärke der Pole bis zu einer gewissen Grenze mit zunehmender Verschiebung wachsen, etwa so wie in Fig. 45 graphisch dargestellt ist, und dann wieder abnehmen. Die Ordinaten geben die Größe des Drehmomentes für die jedesmalige Lage der Mitte eines Südpoles als Abszissen.

Das Drehmoment ist für eine Verschiebung $\left(\frac{\pi}{2} - \psi_m\right)$ des Südpoles nach rechts im Drehsinne des Feldes positiv und erreicht sein Maximum, wenn die Verschiebung gleich der Hälfte der Polteilung ist. Für eine Verschiebung $\left(\frac{\pi}{2} - \psi_g\right)$ nach links im entgegengesetzten Sinne der Drehrichtung wird der Motor zum Generator und gibt als solcher die größte Leistung ab, wenn $\psi_g = 0$, d. h. wenn $\frac{\pi}{2} - \psi_g$ der halben Polteilung entspricht. Beim Motor stoßen somit die Pole des Ankerfeldes (siehe Fig. 43) die gleichnamigen Pole des Magnetsystems in der Drehrichtung ab und ziehen die Pole entgegengesetzter Polarität in der Drehrichtung mit sich. Wenn die Maschine als Generator läuft, ist es umgekehrt; hier schieben die Pole des Magnetsystems die gleichnamigen Pole des Ankerfeldes vor sich und ziehen die Pole entgegengesetzter Polarität nach sich. Der Arbeitsbereich ist für alle Phasenverschiebungswinkel ψ_m und ψ_g stabil. Dagegen fällt, wie wir später sehen werden, der Motor außer Tritt, wenn die Differenz $\Theta = \psi_g - \psi_m$ der beiden Phasenverschiebungswinkel größer wie ca. 90^0 wird.

Die Wirkungsweise eines einphasigen Wechselstrommotors läßt sich ebenfalls durch die Wirkung von Drehfeldern erklären. Wir machen hierbei von der Zerlegung eines Wechselfeldes in zwei Drehfelder Gebrauch.[1])

Fig. 46. Zerlegung eines Wechselfeldes in zwei Drehfelder.

In Fig. 46 sei $OA_1 = OA_2$ die Amplitude eines nach einer Sinuskurve variierenden Wechselfeldes, dessen Richtung mit der Linie A_1A_2 zusammenfällt. Die Momentanwerte dieses Wechselfeldes sind gleich der Projektion OC eines mit gleichförmiger Geschwindigkeit rotierenden Vektors $OA = OA_1$ auf die Gerade A_1A_2.

---

[1]) Vom Verfasser in der Zeitschr. f. Elektrotechnik 1894 angegeben.

Wie wir später sehen werden, wird ein sinusförmiges Drehfeld graphisch durch einen rotierenden Vektor dargestellt. Die Richtung dieses Vektors gibt die räumliche Lage der maximalen Feldstärke und die Größe des Vektors die konstante maximale Stärke des Drehfeldes an. Wir betrachten nun die beiden Drehfelder OD_1 und OD_2 von der konstanten Stärke OB gleich der halben Amplitude des Wechselfeldes;

$$\overline{OD_1} = \overline{OD_2} = \frac{1}{2}\overline{OA_1}$$

von denen das eine nach rechts und das andere nach links rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi c$. Die jeweilige Resultierende dieser beiden Felder fällt stets mit der Richtung der Geraden $A_1 A_2$ zusammen und ihre Größe ist gleich der momentanen Stärke des Wechselfeldes. Die beiden Drehfelder sind somit in ihrer Wirkung dem doppelt so starken Wechselfeld gleich und können dieses ersetzen.

Nehmen wir nun zunächst an, es sei in Fig. 41 das Magnetsystem des Motors in Ruhe, und wir führen dem Anker Wechselstrom zu, so werden sich die beiden Drehfelder D_1 und D_2 mit gleicher Geschwindigkeit relativ zum Magnetsystem bewegen, beide äußern ein gleiches Drehmoment, aber ihre Richtung ist einander entgegengesetzt und das resultierende Drehmoment ist Null. Bringen wir das Magnetsystem M in der Richtung D_1 auf synchrone Geschwindigkeit, so ist D_1 relativ zu M in Ruhe und kann daher ebenso wie das Drehfeld eines Mehrphasenmotors ein großes Drehmoment äußern; das Feld D_2 bewegt sich entgegengesetzt zu M und hat relativ zu M die doppelte Winkelgeschwindigkeit gleich $2 \cdot 2\pi c$. Seine Wirkung wird infolge der magnetischen Schirmwirkung der Pole und der dämpfenden Wirkung der von ihm in den Erregerwindungen induzierten Ströme stark abgeschwächt, so daß nahezu nur das Drehmoment D_1 übrig bleibt.

Von dieser Zerlegung des Wechselfeldes in zwei Drehfelder werden wir auch bei den Generatoren später Gebrauch machen, um die Ankerrückwirkung zu berechnen.

Wie aus dem obigen hervorgeht, unterscheiden die Synchronmotoren sich in der Bauart und Anordnung der Wicklungen nicht von den gewöhnlichen Generatoren. Die Synchronmotoren bedürfen zur Erregung des Magnetsystems (Induktors) ebenfalls eines Gleichstromes, der meistens einer kleinen Gleichstrommaschine, die direkt mit der Welle des Synchronmotors gekuppelt ist, entnommen wird. In einzelnen Fällen werden die Synchronmotoren selbsterregend gemacht, indem ein Teil des Wechselstromes mittels eines synchron

laufenden Kommutators in Gleichstrom, der zur Erregung der Feldmagnete dient, umgewandelt wird. Durch diese Anordnung verliert der Synchronmotor jedoch nicht seine charakteristischen Eigenschaften, nämlich das mit Gleichstrom erregte Feld und die körperlichen Pole, welche den synchronen Gang bedingen.

4. Die asynchronen Maschinen und ihre Wicklungen.

Ferraris und Tesla haben gezeigt, daß es möglich ist, Wechselstrommotoren ohne Gleichstromerregung zu bauen.

Diese Motoren arbeiten mit Wechselstrom allein, sind äußerst einfach, lassen sich für beliebig kleine Leistungen mit gutem Wirkungsgrade ausführen und lösten daher das Problem der Kraftverteilung mit Wechselstrom in vorzüglicher Weise. —

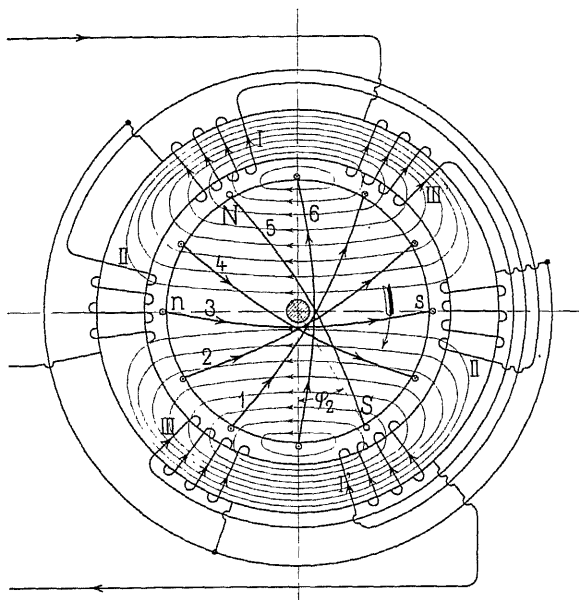



Fig. 47. Dreiphasen-Asynchronmotor mit vielphasiger Kurzschlusswicklung.

In Fig. 47 ist das Wicklungsschema eines derartigen Dreiphasenmotors dargestellt. Die äußere Wicklung oder die Ankerwicklung ist übereinstimmend mit derjenigen eines Drehstromgenerators oder Synchronmotors, auf einem aus Eisenblechringen hergestellten Zylinder angeordnet; sie steht mit der Stromquelle in

Verbindung. Um Schleifringe ganz zu vermeiden, setzen wir voraus, daß dieser Teil fest stehe; er wird infolgedessen auch Stator oder Ständer genannt. Die Feldwicklung ist auf einer aus lamelliertem Eisen hergestellten drehbar gelagerten Trommel (Rotor oder Läufer genannt) gewickelt und besteht aus mehreren am Umfange gleichmäßig verteilten und in sich kurzgeschlossenen Spulen; man kann sie als vielphasige Kurzschlußwicklung bezeichnen.

Durch die Ankerwicklung, die hier auf dem Stator angeordnet ist, wird dem Motor die elektrische Energie zugeführt; diese Wick-

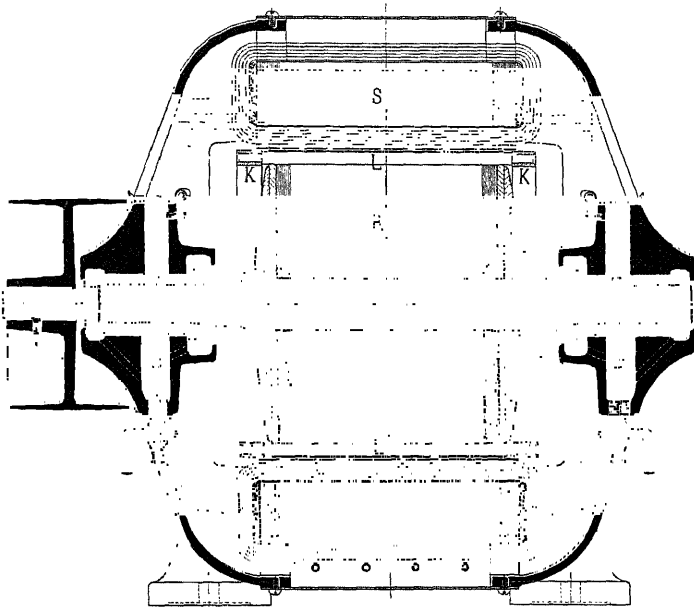



Fig. 48. Asynchroner Dreiphasenmotor mit Ringwicklung auf dem Ständer und Kurzschlußwicklung auf dem Läufer.

lung wird deswegen wie bei den Transformatoren die primäre Wicklung genannt. Die Feldwicklung spielt dieselbe Rolle wie eine Sekundärwicklung und wird deshalb oft so genannt.

In Fig. 47 ist ebenso wie in Fig. 43 jener Moment festgehalten, in welchem der Strom der Spulen II—II′ Null ist, in I—I′ sich vom Maximum entfernt und in III—III′ sich dem Maximum nähert. Das erzeugte Drehfeld ist somit rechtsläufig, seine Achse fällt in dem betrachteten Momente in die Richtung n—s, für welche der Kraftfluß durch dünne Linien angedeutet ist.

Setzen wir zunächst voraus, der Rotor sei ruhend, so wird

das Drehfeld in den kurzgeschlossenen Windungen desselben (1 bis 6 in Fig. 47) Ströme induzieren. Diese Ströme sind entsprechend der gegeneinander verschobenen Lage der kurzgeschlossenen Windungen in der Phase verschoben und erzeugen ebenso wie die primären Windungen ein Drehfeld, das Rotorfeld, das sich mit gleicher Winkelgeschwindigkeit wie das primäre Drehfeld bewegt und mit ihm ein resultierendes, für Stator und Rotor gemeinsames Drehfeld erzeugt. Zwischen diesem Drehfelde und den Rotorströmen bestehen anziehende Kräfte; es wird also auf den Rotor ein Drehmoment ausgeübt, und er wird gezwungen dem Drehfelde zu folgen.

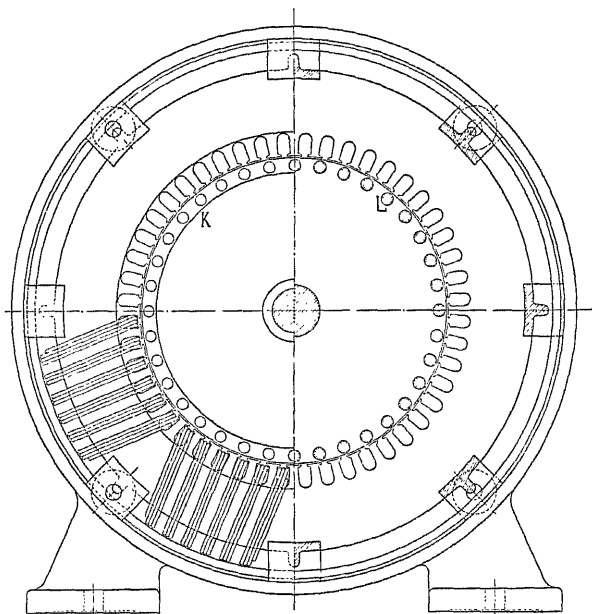



Fig. 49. Asynchroner Dreiphasenmotor mit Ringwicklung auf dem Ständer und Kurzschlußwicklung auf dem Läufer.

Fließt der Strom J_R durch einen Leiter der Rotorwicklung von der Länge l und befindet er sich in einem Felde von der Intensität B_l, so wirkt auf den Leiter die mechanische Kraft $B_l J_R l$. Da die Ströme der Rotorleiter zusammen einen Mehrphasenstrom bilden und da das magnetische Feld ein Drehfeld ist, so erzeugen alle auf die Rotorleiter ausgeübten mechanischen Kräfte in jedem Augenblicke ein konstantes Drehmoment. In dieser Weise wird die der Statorwicklung durch den Betriebsstrom zugeführte elektrische Energie in mechanische Arbeit umgesetzt.

Würde der Rotor die synchrone Geschwindigkeit erreichen,

so wäre die relative Geschwindigkeit von Rotor und Drehfeld Null, die Induktion in der Rotorwicklung Null und daher auch das Drehmoment Null. Soll die Maschine mechanische Arbeit leisten, so muß daher die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors immer kleiner sein, als die synchrone Geschwindigkeit. Bezeichnen wir letztere mit v, so ist die Geschwindigkeit des Rotors $(1-s)v$, wenn s die sogenannte Schlüpfung bezeichnet. Für Stillstand des Rotors ist $s=1$ und für Synchronismus $s=0$. Die relative Geschwindigkeit des Rotors zum Drehfelde ist $s \cdot v$. Man bezeichnet daher diese sich selbst erregenden Motoren als Asynchronmotoren, oder da das Rotorfeld durch Induktion erzeugt wird, als Induktionsmotoren.

Diese Wirkung kommt zustande, einerlei, welche der beiden Wicklungen feststeht.

Ist die sekundäre Wicklung auf dem Stator und die primäre auf dem Rotor, so dreht sich der Rotor entgegengesetzt zur Richtung des eigenen magnetischen Feldes mit der Geschwindigkeit $(1-s)v$, so daß die wirkliche Geschwindigkeit des Drehfeldes jetzt $s \cdot v$ ist, d. h. relativ zur Sekundärwicklung dieselbe, wie bei der umgekehrten Anordnung.

Wird der Rotor z. B. von der Riemenscheibe aus übersynchron angetrieben, so daß er sich mit der Geschwindigkeit $(1+s)v$ bewegt, so hat die relative Geschwindigkeit von Rotor und Drehfeld den Sinn gewechselt, anstatt $-s \cdot v$, wie im Motor, ist sie jetzt $+s \cdot v$. Infolgedessen hat der in der Rotorwicklung induzierte Strom ebenfalls die entgegengesetzte Richtung angenommen, d. h. das sekundäre Feld hat seine Richtung gewechselt. Diese Umkehrung hat eine Umkehrung der Richtung des Wattstromes in der Statorwicklung zur Folge, d. h. der asynchrone Motor wird zum asynchronen Generator. Der wattlose Erregerstrom behält dagegen seine Richtung bei und wird dem asynchronen Generator ebenso wie dem Motor von außen durch den parallel mit ihm arbeitenden synchronen Generator zugeführt. Der asynchrone Generator kann daher mit dieser Schaltung nur gemeinsam mit synchronen Maschinen zur Wirkung gelangen.

Diese Abhängigkeit des asynchronen Generators von synchronen Maschinen ist dadurch bedingt, daß die Felderregung durch Induktion von der primären Wicklung aus erfolgt. Wie Görges, Latour und Heyland gezeigt haben, ist es möglich, den erregenden Wechselstrom dem Rotor direkt zuzuführen. Zu dem Zwecke erhält der Rotor eine geschlossene oder aufgelöste Gleichstromwicklung mit Kommutator und der erregende Wechselstrom wird im Nebenschluß zur Primärwicklung, der Gleichstromwicklung durch Schleifbürsten zugeführt. — Von dieser Art Erregung kann bei jeder Schlüpfung, also auch dann, wenn die Maschine als Motor

arbeitet, Gebrauch gemacht werden; ferner ist es möglich, die sekundäre Wicklung mit der primären in Serie zu schalten. —

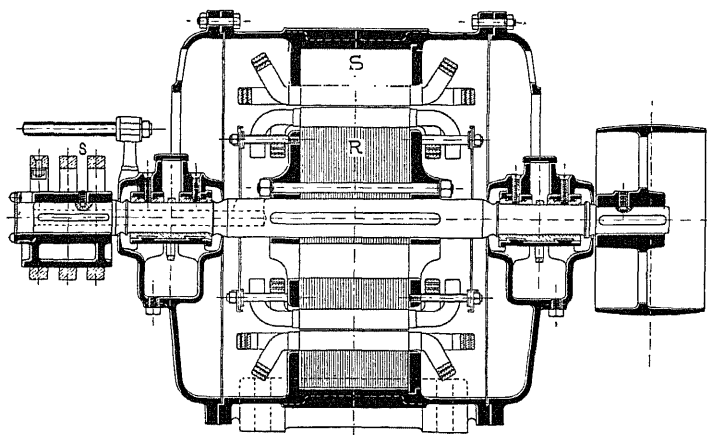



Fig. 50. Asynchroner Motor der Maschinenfabrik Örlikon mit dreiphasiger Trommelwicklung auf Ständer und Läufer.

Wir sehen hieraus, daß die Gleichstromwicklungen sowohl bei den synchronen als den asynchronen Maschinen eine vielseitige Anwendung finden. Ferner hat der Verfasser die Gleichstromwicklung auch bei einphasigen Wechselstromrepulsionsmotoren angewandt.[1])

Fig. 51. Asynchroner Motor der Maschinenfabrik Örlikon. Querschnitt ohne Wicklung.

Bisher haben wir der Einfachheit wegen nur die Ringwicklung betrachtet.

Die Figuren 48 und 49, welche einen asynchronen Motor darstellen, zeigen, wie eine Ringwicklung etwa ausgeführt wird. Die Ringwicklung hat den Nachteil, daß ein großer Teil des Kraftflusses sich nicht durch das Rotoreisen und durch die Rotorwicklung schließt, sondern als Streufluß nur mit

[1]) Amerik. Patent 543838 August 1895 und 562365 Juni 1896. Die Motoren werden von der Wagner Electric. Mfg. Co. St. Louis gebaut.

der Statorwicklung verkettet ist; denn die ganze Länge einer Windung schließt sich eng dem Eisenkern an, und diese Länge ist zudem meistens größer, als bei einer Trommelwicklung.

Die Rotorwicklung ist in Fig. 48 und 49 eine sogenannte Käfigwicklung; jeder Leiter L derselben entspricht einer Phase, und alle Leiter sind vorn und hinten durch die Kurzschlußringe K verbunden. Die Käfigwicklung ist eine vielphasige Kurzschlußwicklung und wird für kleine Motoren sehr viel angewandt.

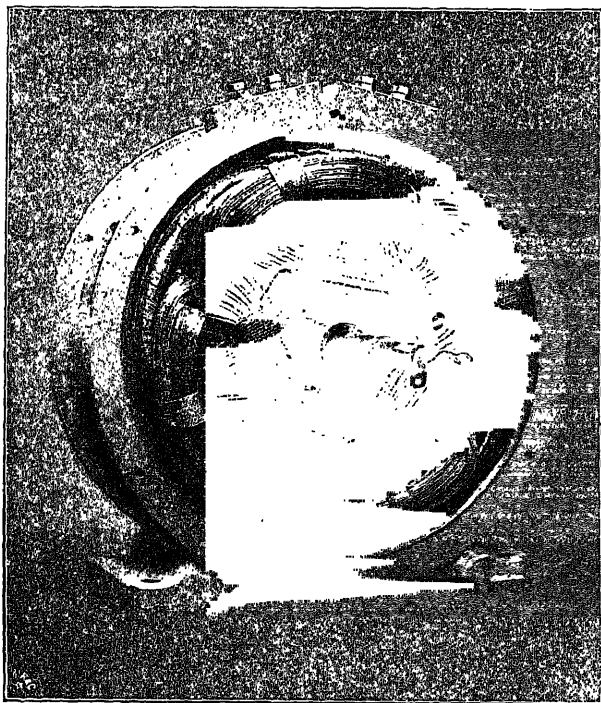



Fig. 52. Asynchronmotor der Société Electricité et Hydraulique, Charleroi.

In mechanischer und elektrischer Hinsicht ist die Trommelwicklung, welche eine Seite des Eisenkernes frei läßt, für den Bau des Motors der Ringwicklung vorzuziehen.

Fig. 50 und 51 zeigt den Schnitt durch einen modernen asynchronen Motor mit Trommelwicklung auf dem Stator S und Rotor R. Die Rotorwicklung ist hier dreiphasig mit Sternschaltung ausgeführt, und zur Regulierung des Drehmomentes beim Anlauf sind die Enden der drei Phasen durch die hohle Welle geführt und an drei Schleif-

ringen *s* angeschlossen, so daß Widerstand in jede Phase eingeschaltet werden kann.

Im Querschnitt Fig. 51 sind die genuteten Bleche ohne Wicklung dargestellt.

Fig. 52 zeigt die Photographie eines kleineren und Fig. 53 die eines größeren modernen Asynchronmotors.

Der kleine Motor Fig. 52 hat auf dem Stator und Rotor eine dreiphasige Drahtwicklung. Die drei Enden der Rotorwicklung sind

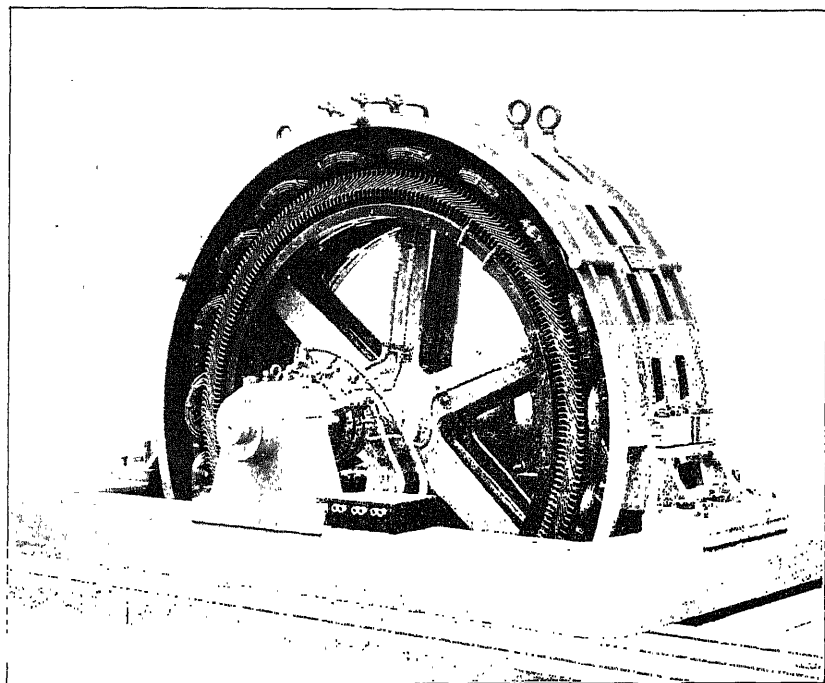



Fig. 53. Asynchronmotor der Siemens-Schuckert-Werke.

durch die hohle Welle geführt, um an Schleifringe angeschlossen werden zu können.

Bei dem großen Motor Fig. 53 besitzt der Stator eine Drahtwicklung für hohe Spannung, während der Rotor eine Stabwicklung erhalten hat. Die Verbindungen zwischen der Rotorwicklung und den Schleifringen sind auf dem Bilde deutlich sichtbar.

Der auf Seite 25 erwähnte selbsttätige Anlauf von nicht erregten oder nur schwach erregten mehrphasigen Synchronmotoren erklärt sich auf dieselbe Weise wie der Anlauf der

asynchronen Motoren. Das Drehfeld des Ankers erzeugt in den Polschuhen des Feldes Wirbelströme und in der Erregerwicklung Wechselströme. Das Drehmoment kommt durch gegenseitige Einwirkung dieser induzierten Ströme und des Drehfeldes zustande.

Die Wicklung der einphasigen asynchronen Motoren unterscheidet sich von den mehrphasigen nur in der Ständerwicklung, die einphasig ist, während der Rotor mehrphasig bleibt. Die Wirkungsweise dieses Motors läßt sich durch die Zerlegung des Wechselfeldes in zwei Drehfelder erklären, wie auf Seite 27 gezeigt wurde. Das eine Drehfeld bewegt sich dann synchron mit dem Rotorfeld und übt das Drehmoment aus, während das andere sich entgegengesetzt zum Rotorfeld und relativ dazu mit doppelter Geschwindigkeit bewegt und nur ein kleines negatives Drehmoment äußert. Nur bei Stillstand sind das positive und das negative Drehmoment gleich, und der Motor muß durch besondere Vorrichtungen zum Anlaufe gebracht werden.

5. Einteilung der Wechselstromwicklungen.

In dem vorhergehenden Kapitel haben wir die Wicklungen der ein- und mehrphasigen Generatoren, Synchronmotoren, Umformer und asynchronen Motoren im Prinzipe, und zwar meist nur für die einfache zweipolige Ringwicklung kennen gelernt. Praktisch kommt jedoch die Ringwicklung wenig in Betracht, sondern fast ausschließlich die Trommelwicklung.

Die zweiphasigen Wicklungen unterscheiden sich von den vierphasigen und die dreiphasigen von den sechsphasigen nur durch die Verbindungsart der Spulen oder die Anordnung der Ableitungen. Wir fassen sie daher jeweils in eine Gruppe zusammen.

Alle genannten Wechselstromwicklungen lassen sich dann in folgende Gruppen einteilen:

I. Spulenwicklungen.
- a) einphasige,
- b) zweiphasige, bezw. vierphasige,
- c) dreiphasige, bezw. sechsphasige.

II. Umlaufende Wicklungen.
- a) einphasige,
- b) zweiphasige, bezw. vierphasige,
- c) dreiphasige, bezw. sechsphasige.

III. Unveränderte Gleichstromwicklungen mit Abzweigungen für beliebige Phasenzahl.

IV. Aufgeschnittene Gleichstromwicklungen.
   a) einphasige,
   b) zweiphasige, bezw. vierphasige,
   c) dreiphasige, bezw. sechsphasige.

V. Veränderte Gleichstromwicklungen.

VI. Vielphasige Wicklungen.
   Kurzschluß- und Käfigwicklungen.

Bemerkung über die Darstellung der Wicklungen. Verschiedene Wicklungsebenen sind in der Regel durch ausgezogene und gestrichelte Linien unterschieden. Bei den Mehrphasenwicklungen ist meist eine Phase durch stärkere Striche hervorgehoben. Ferner wird, obgleich wir es mit Wechselstrom zu tun haben, eine Stromrichtung angenommen; diese entspricht dann jeweils nur einem bestimmten kurzen Zeitraume. Man erreicht durch die Annahme einer Stromrichtung den Vorteil, daß der Sinn der Drahtführung verständlicher wird und daß die Polarität deutlicher hervortritt. Ein Kreis mit Kreuz bedeutet, daß der Strom in die Papierebene eintritt und ein Kreis mit Punkt die umgekehrte Richtung. Diese Darstellung gründet sich auf die Annahme, daß die Stromrichtung durch einen Pfeil angedeutet sei; das Kreuz bedeutet die Pfeilfeder, der Punkt die Pfeilspitze.

In der Darstellung werden wir uns auf das wechselpolige Magnetsystem beschränken, weil sich die gleichpoligen Wicklungen prinzipiell in keiner Weise von den wechselpoligen unterscheiden. (Siehe Seite 10.)

Die Drähte der Armatur werden gewöhnlich in Nuten oder Löchern des Eisens eingebettet, ebenso die Feldwicklung der asynchronen Motoren. Ist die Anzahl der Löcher pro Pol und Phase 1, 2, 3 u. s. f., so bezeichnet man die Wicklung als Ein-, Zwei- oder Dreilochwicklung. Sind die Drähte gleichmäßig über die ganze Polteilung auf viele Löcher verteilt, so spricht man von einer verteilten Wicklung.

Zweites Kapitel.

Gewöhnliche Wechselstromwicklungen.

6. Die Spulenwicklungen. — 7. Die umlaufenden Wicklungen.

6. Die Spulenwicklungen.

Das Kennzeichen der Spulenwicklung besteht darin, daß die Windungen pro Pol und Phase oder pro Polpaar und Phase zu einer oder mehreren Spulen zusammengefaßt und für sich vollständig fertig gewickelt werden. Nachdem alle Spulen fertiggestellt sind, werden sie in passender Weise miteinander verbunden.

Die Spulenwicklung kommt immer zur Anwendung, wenn die Windungszahl pro Pol und Phase groß ist. Die maximale Spannungsdifferenz von zwei benachbarten Spulen einer Phase ist gleich der zweifachen Spannung einer Spule, und die Spannung zwischen den Drähten einer Spule ist ebenfalls klein, die Spulenwicklung kommt daher insbesondere für Hochspannungsmaschinen in Betracht.

Fig. 54. Einphasen-Einlochwicklung.

a) Einphasige Spulenwicklungen.

Fig. 54 veranschaulicht eine achtpolige einphasige Einlochwicklung. Die Spulenköpfe auf der vorderen Seite sind nach außen, die auf der hinteren Seite nach innen gezeichnet und die Verbindungen der Spulen untereinander sind durch punktierte dünne Linien dargestellt.

Oft ist es erforderlich oder zweckmäßig, einer Spule noch eine halbe Windung hinzuzufügen. In diesem Falle sind, wie Fig. 55 zeigt, die Querverbindungen der Spulen auf beide Seiten verteilt.

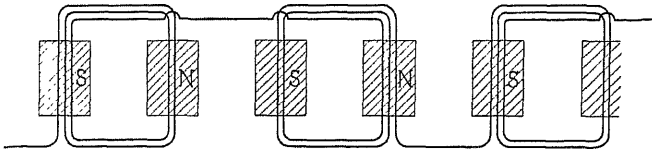



Fig. 55. Spulenwicklung mit $2^1/_2$ Windungen pro Spule.

Eine bessere Verteilung der Spulenköpfe wird erhalten, wenn die Windungen jeder Spule in zwei Teile geteilt und nach Fig. 56 angeordnet werden, wir erhalten nun doppelt so viel Spulen mit halber Windungszahl.

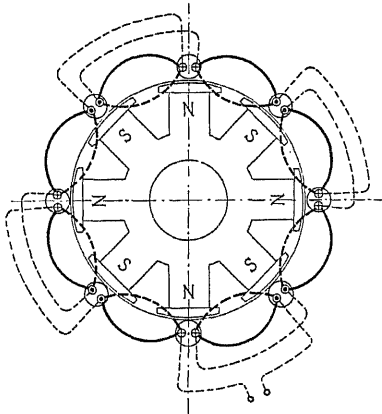



Fig. 56. Einphasen-Einlochwicklung mit gleichmäßig verteilten Spulenköpfen.

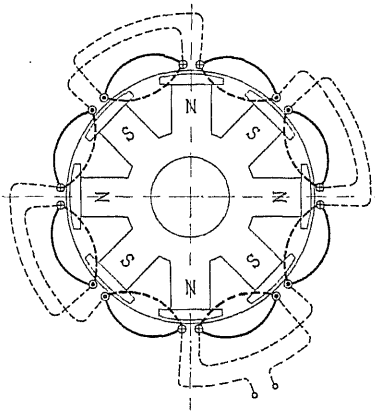



Fig. 57. Einphasige Zweilochwicklung mit gleichmäßig verteilten Spulenköpfen.

Verteilt man die Spulen auf zwei Löcher pro Pol, so entsteht die Wicklung Fig. 57. Die Lochteilung ist gleich $^1/_6$ der Polteilung gewählt.

Eine einphasige Vierlochwicklung stellen die Fig. 58 bis 60 dar. Elektrisch ist es gleichgültig, in welcher Reihenfolge die Drähte verbunden werden, so lange sich die induzierten EMKe unterstützen. Beim Verfolgen des Schemas können also abwechselnd Kreis mit Kreuz und Kreis mit Punkt in beliebiger Lage aufeinander folgen.

In Fig. 58 umfassen die Drähte einer Spule vier Seiten. Die Spulenköpfe werden kürzer, der Kupferverbrauch kleiner und die

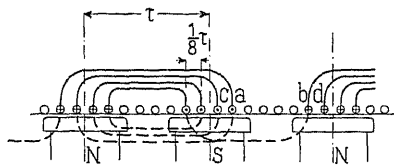



Fig. 58. Einphasige Vierlochwicklung mit Vierlochspulen.

Verteilung der Spulenköpfe wird eine bessere, wenn wir *a* mit *b* und *c* mit *d* verbinden, es entsteht dann das Schema Fig. 59. —

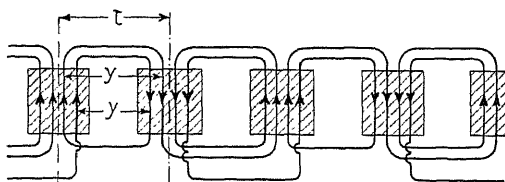



Fig. 59. Einphasige Vierlochwicklung mit Zweilochspulen.

Für eine Wicklung, die aus Kupferstäben zusammengelötet, anstatt aus Kupferdraht gewickelt wird, ist es vorteilhaft, wenn eine Spule

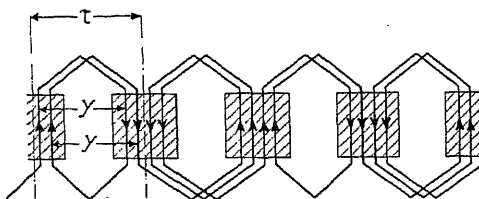



Fig. 60. Einphasige Vierloch-Stabwicklung.

aus gleichen Teilen zusammengesetzt werden kann. Dieser Bedingung entspricht das Schema Fig. 60; die Weite *y* der Windungen ist immer die gleiche.

Liegen zwei Stäbe in einer Nut, so können diese nebeneinander oder übereinander angeordnet werden. Dem letzten Falle entspricht das Schema Fig. 61. Die eine Lage der Stäbe ist punktiert gezeichnet. Die aufeinanderfolgenden Spulen werden auf dem Wege *ac* und *df* verbunden, indem man bei *a* und *d* von einer Lage in die andere übergeht, oder auf dem Wege *abc* und *def* verbunden.

In Fig. 62 ist das vollständige in die Papierebene abgerollte Schema einer einphasigen Spulenwicklung mit 8 Löchern pro Pol, von denen 4 bewickelt sind, dargestellt. Das Verhältnis der Spulenbreite zur Polteilung ist $S:\tau = \frac{1}{2}$.

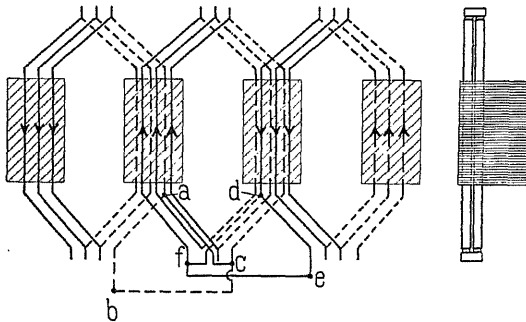



Fig. 61. Einphasige Dreiloch-Stabwicklung mit zwei übereinanderliegenden Stäben pro Loch.

Fig. 63 gibt eine achtpolige Spulenwicklung mit 9 Löchern pro Pol, von denen drei bewickelt sind, es ist somit $S:\tau = \frac{1}{3}$. In jedem Loch sind zwei Stäbe untergebracht, die ausgezogenen Querverbindungen sind in der einen und die punktierten in einer zweiten Ebene angeordnet.

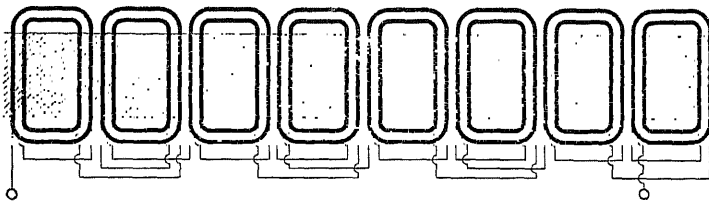



Fig. 62. Achtpolige einphasige Spulenwicklung mit acht Löchern pro Pol, wovon vier bewickelt.

b) Zweiphasige Spulenwicklungen.

Verschieben wir zwei einphasige Wicklungen um eine halbe Polteilung gegeneinander, so entsteht eine zweiphasige Wicklung. In den Fig. 64, 65 und 66 sind Einlochwicklungen dargestellt.

Das vollständige Schema einer sechspoligen Zweilochwicklung mit in die Papierebene umgeklappten Spulen gibt Fig. 67.

Bei großen Maschinen wird die Armatur aus zwei oder mehr Teilen hergestellt. Es ist für die Montage bequem, wenn die

Trennungsfuge durch keine Spule überdeckt wird, sonst ist man genötigt, bei Lochwicklungen diejenige Spule, welche die Fuge

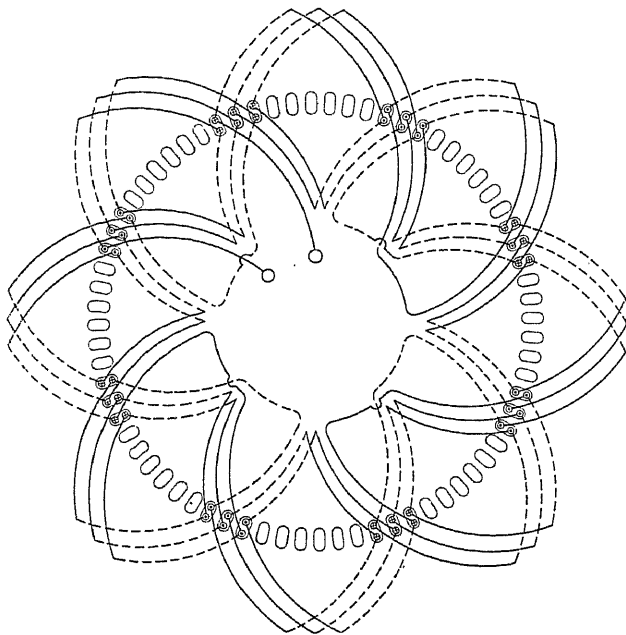



Fig. 63. Achtpolige einphasige Spulen-Stabwicklung mit neun Löchern pro Pol, wovon drei bewickelt.

überdeckt, nach der Montage der Maschine zu wickeln oder die offenen Nuten in diese einzulegen.

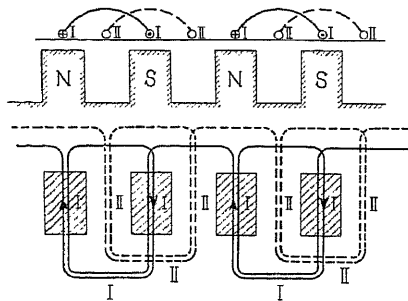



Fig. 64 und 65. Zweiphasen-Einlochwicklung.

Bei Zweiphasenwicklungen kann man, wenn die halbe Polzahl p gerade ist, stets freie Trennungsfugen erhalten.

Drei verschiedene Anordnungen der Spulenköpfe für eine achtpolige Zweilochwicklung mit freien Trennungsfugen geben die

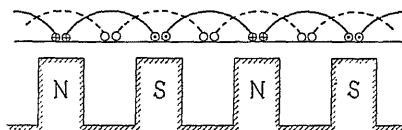



Fig. 66. Zweiphasen-Einlochwicklung mit gleichmäßig verteilten Spulenköpfen.

Fig. 68 und 69. In Fig. 68[1]) sind auf der unteren Armaturhälfte die Spulenköpfe *a* und *b* nach innen gebogen.

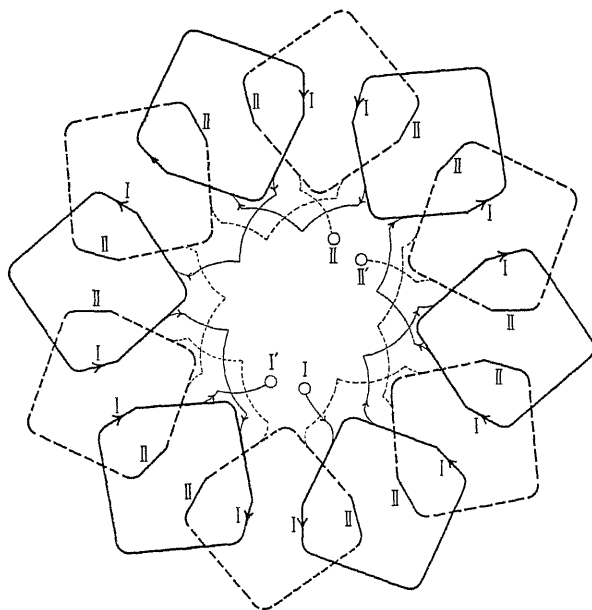



Fig. 67. Sechspolige Zweiphasenwicklung mit zwei Löchern pro Pol und Phase und Einlochspulen.

Bei Stabwicklungen wird eine gleichmäßige Verteilung der Stabverbindungen erreicht, wenn man die eine Hälfte dieser Verbindungen pro Pol und Phase zum vorbeigehenden und die andere Hälfte zum folgenden Pole führt, wie Fig. 70 zeigt.

Eine vollständige zweiphasige, achtpolige Schleifenwicklung ist in Fig. 71 dargestellt.

---

[1]) Es ist nur eine Seite der Wicklung dargestellt.

c) Dreiphasige Spulenwicklungen.

Bei den dreiphasigen Wicklungen müssen wir kurze und lange Spulen unterscheiden; die Weite der kurzen Spulen ist $\frac{2}{3}\tau$ und die Weite der langen Spulen gleich τ.

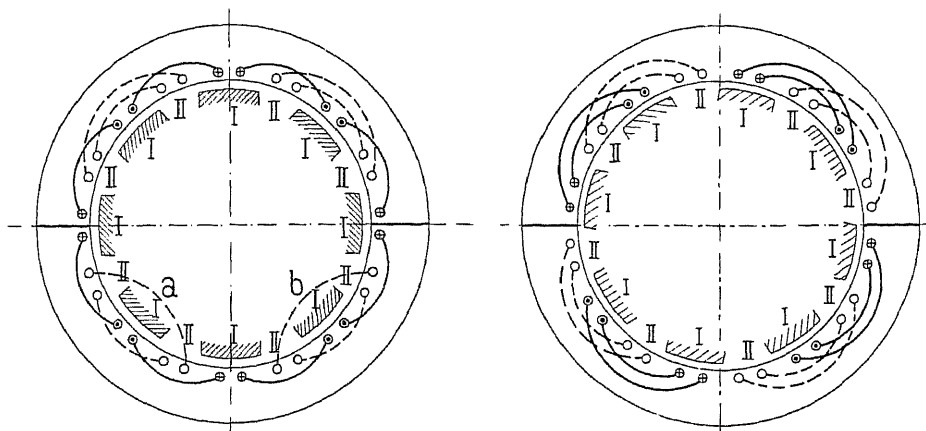



Fig. 68 und 69. Achtpolige zweiphasige Zweilochwicklung mit freien Teilfugen.

In den Fig. 72 und 74 sind Wicklungen mit kurzen Spulen dargestellt. Die momentane Lage der Spulen gegenüber den Polen entspricht der Lage der Zeitlinie $B_1 B_2$ im Vektordiagramm, Fig. 73,

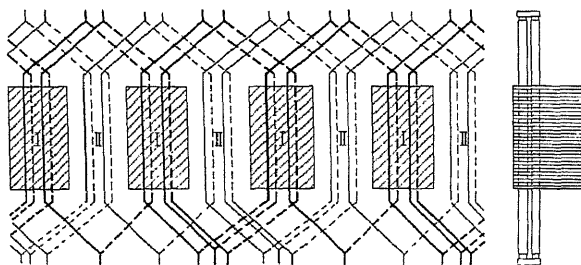



Fig. 70. Zweiphasige Zweiloch-Stabwicklung mit zwei übereinander liegenden Stäben.

die in Spule II induzierte EMK ist Null, die in Spule III nähert sich dem Maximum und die in Spule I dem Werte Null. — Diese Wicklungsart hat den Vorzug, daß die Spulen der drei Phasen sich nicht kreuzen, jedoch den großen Nachteil, daß die Kurve der

EMK stark von der Sinusform abweicht und die Windungsfläche einer Spule nicht den ganzen Kraftfluß pro Pol umfaßt.

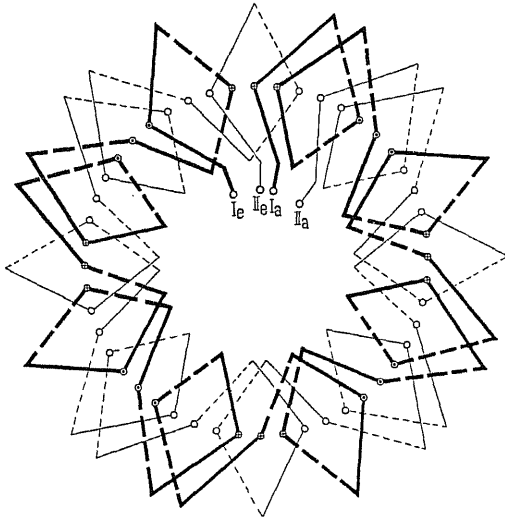



Fig. 71. Zweiphasige, achtpolige Schleifenwicklung.

Einlochwicklungen mit langen Spulen und verschiedener Anordnung der Spulenköpfe geben die Fig. 75, 76 und 77. Die

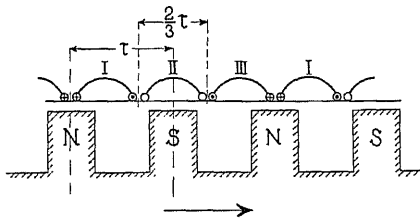



Fig. 72. Dreiphasenwicklung mit kurzen (ungekreuzten) Spulen.

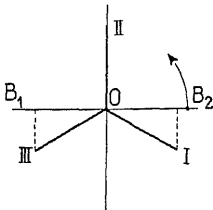



Fig. 73. Vektordiagramm.

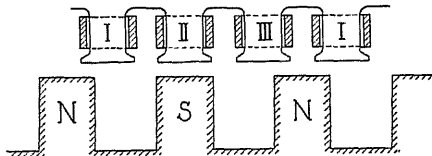



Fig. 74. Dreiphasenwicklung mit kurzen (ungekreuzten) Spulen.

Schemas Fig. 75 und 76 können wir aus drei Einphasenwicklungen, die um $^1/_3$ bezw. $^2/_3$ einer Polteilung verschoben sind, entstanden

denken, und Fig. 77, in der keine Spulenkreuzungen mehr vorhanden sind, entsteht aus Fig. 76 durch Weglassung jeder zweiten Spule. — Für Sternschaltung bilden je drei Spulenenden, I, II, III, die um $^2/_3$ einer Polteilung oder ein ganzes Vielfaches von-

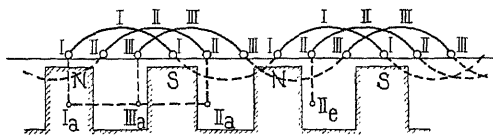



Fig. 75. Dreiphasenwicklung mit langen gekreuzten Spulen.

einander entfernt sind, die Klemmen oder den neutralen Punkt der Wicklung.

Bei der Anordnung der Spulen kann entweder auf die Freihaltung von Trennungsfugen oder auf eine gleichmäßige Verteilung

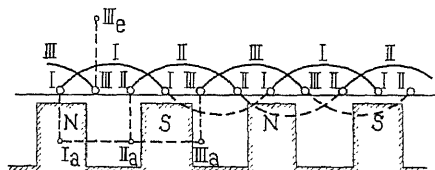



Fig. 76. Dreiphasenwicklung mit langen gekreuzten Spulen.

der Spulenköpfe und eine bequeme Ausführung der Querverbindungen der Spulen Rücksicht genommen werden.

Ist die halbe Polzahl gerade und werden die Spulen wie in Fig. 75 angeordnet, so ist, wie die Fig. 78 und 79 zeigen, die

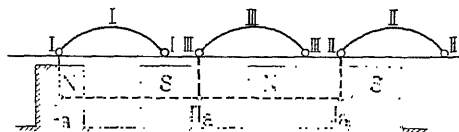



Fig. 77. Dreiphasenwicklung mit langen ungekreuzten Spulen.

Armatur auf dem Durchmesser teilbar, ohne daß eine Spule geschnitten wird. Die Spulenköpfe können, wie in Fig 78, alle in gleicher Form nach außen abgebogen werden; sie kommen dann entweder in drei Ebenen zu liegen (Fig. 78, Spulen *A*), oder man macht die eine Seite jeder Spule länger als die andere und läßt die Spulenköpfe in schrägem Bogen verlaufen (Fig. 78, Spulen *B*). Bei letzterer Anordnung erhalten alle Spulen vollständig gleiche Form.

Die von der Wicklung beanspruchte Länge wird kleiner, wenn man den mittleren Spulenkopf längs einer Sehne, oder wie in Fig. 79,

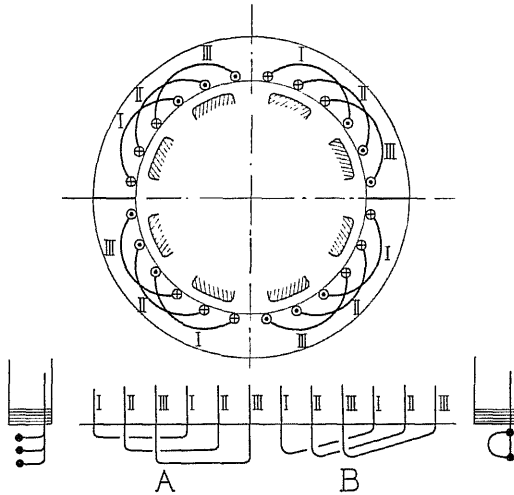



Fig. 78. Dreiphasenwicklung mit verschieden gebogenen Spulenköpfen.

längs einem nach innen gekrümmten Bogen wickelt; die Spulenköpfe liegen dann in zwei oder drei Ebenen.

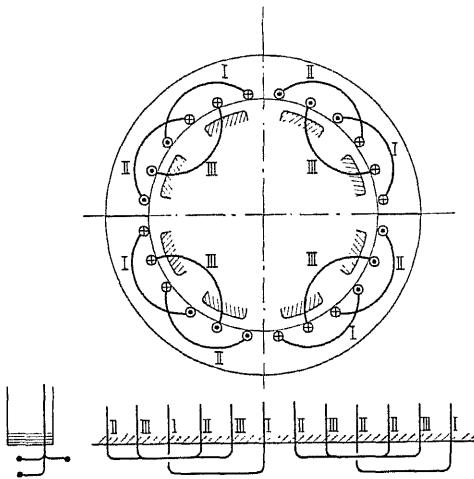



Fig. 79. Dreiphasenwicklung mit verschieden gebogenen Spulenköpfen.

Verteilt man die Spulen nach dem Schema Fig. 76, so entstehen die Wicklungen Fig. 80 und 81. Im ersten Falle (Fig. 80)

erhalten wir kurze und lange Spulenseiten, und die Spulenköpfe liegen in zwei Ebenen, im letzteren Falle (Fig. 81) stehen die Spulen-

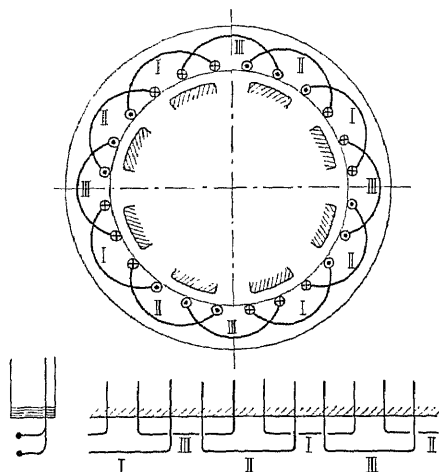



Fig. 80.

köpfe schräg, und die Spulen sind alle einander gleich. Bei hohen Spannungen hat diese Wicklnng den Vorzug, daß abwechselnd lange und kurze Isolierrohre aufeinander folgen.

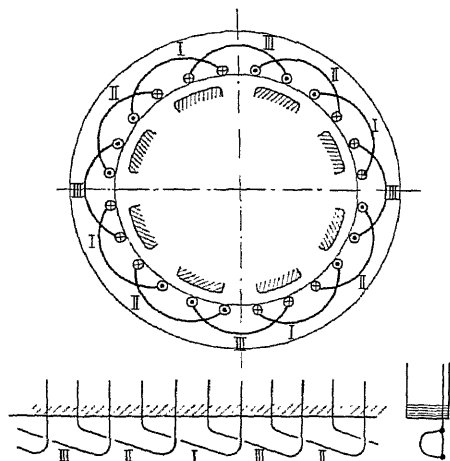



Fig. 81.

Es kann auch die Hälfte der Spulenköpfe nach einer Sehne oder einem zentrischen Bogen gewickelt oder nach innen abge-

bogen werden, wir erhalten dann die Wicklungen Fig. 82a und 82b. In Fig. 82a liegen alle Spulenköpfe in einer Ebene; jede Kreuzung

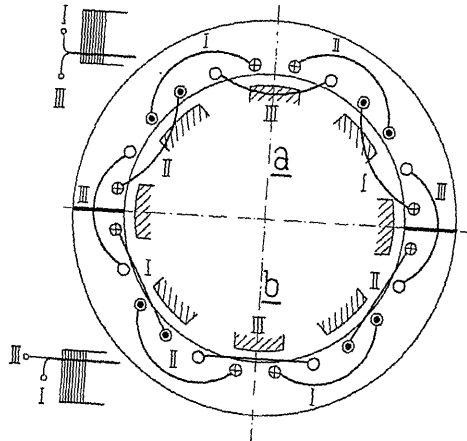



Fig. 82.

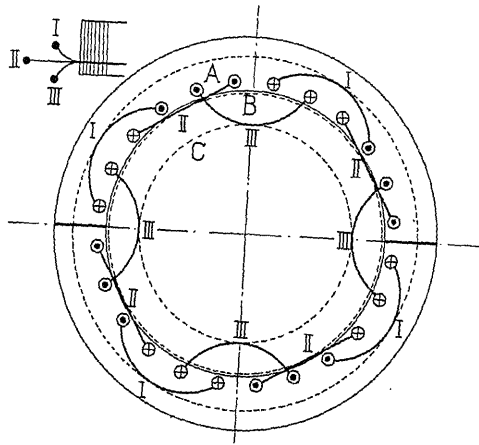



Fig. 83.

Fig. 82 und 83. Dreiphasige Einlochwicklungen mit verschieden abgebogenen Spulenköpfen.

der Spulen ist vermieden, und in axialer Richtung erhält die Wicklung geringste Länge. Um das Magnetrad in die Armatur einbringen zu können, muß letztere in der Horizontalen geteilt sein.

Bei sehr hohen Spannungen ist es zweckmäßig, die Spulenköpfe nach dem Schema (Fig. 83) zu wickeln. Diejenigen der Phase I sind nach außen, diejenigen der Phase III nach innen ab-

gebogen und die der Phase II längs einer Sehne geführt, man erreicht dadurch wie im Schema Fig. 82a einen großen Abstand zwischen den Spulenköpfen, aber außerdem noch eine sehr zweckmäßige Lage der Querverbindungen der Spulen. Diese liegen für jede Phase getrennt auf drei punktiert gezeichneten Kreisen, *A*, *B*, *C* in großer Entfernung voneinander und von den Spulen der anderen Phasen.

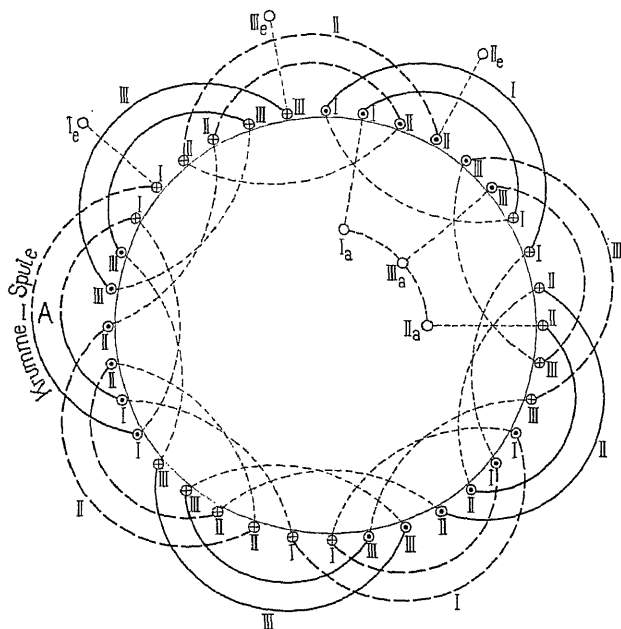



Fig. 84. Sechspolige, dreiphasige Zweilochspulenwicklung.

Die von **Brown, Boveri & Co.** ausgeführten 15000 Volt Drehstrommaschinen der Anlage Paderno-Mailand haben solche Wicklungen.

Die angegebenen Anordnungen der Spulen gelten auch für **Mehrlochwicklungen.**

Das vollständige Schema einer sechspoligen ($p = 3$) Zweiloch-Spulenwicklung gibt Fig. 84.[1]) Die drei Phasen sind nach Schema Fig. 80 gewickelt und in Sternschaltung verbunden. Ist p **ungerade,** so liegt die eine Hälfte des Kopfes einer Spule in der vorderen und die andere Hälfte in der hinteren Ebene; man nennt

[1]) Es ist nur eine Seite der Wicklung dargestellt. Die Verbindungen der einzelnen Spulen sind der Deutlichkeit halber nach innen verlegt.

die betreffende Spule die krumme Spule. In Fig. 84 ist es die Spule *A*. —

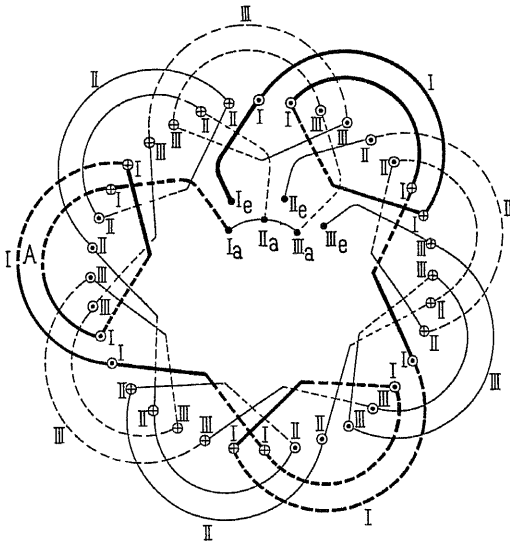



Fig. 85. Sechspolige Spulenstabwicklung mit Verbindungsbügeln auf der einen und Verbindungsgabeln auf der anderen Stirnseite.

Einige dreiphasige Spulen-Stabwicklungen stellen die Fig. 85 und 86 dar. An Fig. 85 ist bemerkenswert, daß die Stäbe

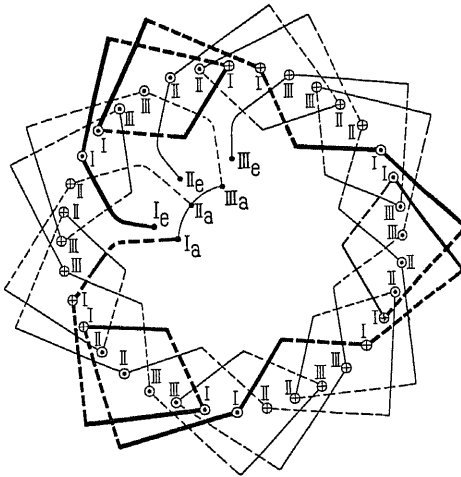



Fig. 86. Sechspolige Zweiloch-Spulenstabwicklung mit Verbindungsgabeln.

auf der einen Seite (außen) durch Bügel und auf der anderen Seite innen durch Gabeln verbunden sind. Die Bügel *A* sind ab-

gekröpft und liegen zur Hälfte in der einen, zur Hälfte in der andern Ebene.

Fig. 86 gibt eine Spulenwicklung, bei der die Querverbindungen der Stäbe auf beiden Seiten (bezw. innen und außen im Schema) aus Gabeln bestehen.

Bei allen bisher beschriebenen Dreiphasenwicklungen war die Lochzahl pro Pol und Phase q eine ganze Zahl. Dies ist jedoch nicht unbedingt notwendig, sondern man kann z. B. auch für q ein Vielfaches von $\frac{1}{2}$ wählen. In Fig. 87 ist eine Wicklung mit $2\frac{1}{2}$ Löchern pro Pol und Phase dargestellt. Die Spulenköpfe der einzelnen Phasen sind wie in Fig. 83 angeordnet. Pro Polpaar sind $6 \cdot 2\frac{1}{2} = 15$ Löcher vorhanden, und die einzelnen Phasen sind so über diese verteilt, daß jede abwechselnd bei einem Polpaar zwei und beim folgenden drei Löcher einnimmt. [1])

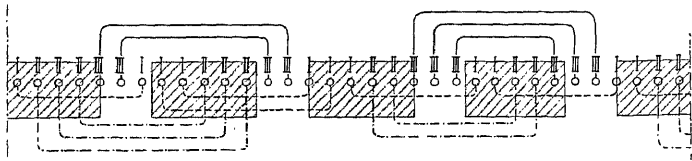



Fig. 87. Spulenwicklung mit $2^1/_2$ Löchern pro Pol und Phase.

Wählt man die Spulenzahl um eins oder zwei größer oder kleiner als die Polzahl, so entstehen die sogenannten schleichenden Wicklungen.

Eine derartige Wicklung ist von v. Dolivo-Dobrowolsky angegeben werden. Die Spulen der drei Phasen sind nicht über den ganzen Umfang der Armatur verteilt, sondern folgen, wie in Fig. 88 dargestellt ist, direkt aufeinander. Die Armatur ist also eine Aneinanderreihung von drei Einphasenarmaturen. Die Spulenzahl wird gleich $2p \pm 1$ gewählt und muß natürlich eine durch m teilbare Zahl sein. Der Spulenabstand wird also

$$\tau' = \frac{2p\tau}{2p \pm 1},$$

und jede Phase nimmt am Umfang einen Raum

$$\frac{2p\tau}{m} = \frac{(2p \pm 1)}{m} \cdot \tau \mp \frac{\tau}{m}$$

[1]) Die dargestellte Wicklung wurde von der Firma Ganz & Co. bei einem 1200 KVA.-Generator für 2200 Volt angewandt, der auf der Weltausstellung Paris 1900 ausgestellt war.

ein. Da $\frac{2p \pm 1}{m}$ immer eine ganze Zahl sein muß, wird also durch die Anordnung die richtige Phasenverschiebung $\frac{\tau}{m}$ erreicht. In Bezug auf die induzierte EMK ist die Wicklung gleichwertig mit einer gewöhnlichen Spulenwicklung von der Spulenbreite $S = \frac{\tau}{3}$. Die getrennte Anordnung der einzelnen Phasen hat Vorteile bei hoher Spannung; sie ist jedoch in bezug auf die Ankerrückwirkung

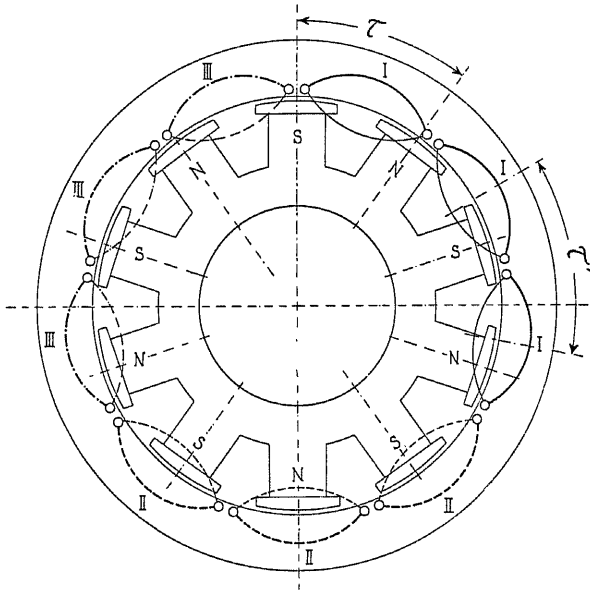



Fig. 88. Schleichende Wicklung von v. Dolivo-Dobrowolsky.

ungünstig, da die Armatur sich wie eine Einphasenwicklung verhält. Ferner wird bei Unsymmetrien im Felde die Spannung der einzelnen Phasen ungleich und schwankt periodisch. Die Maschinen brummen dann, und es können sogar Lichtschwankungen auftreten, die den Betrieb unmöglich machen. Die Anwendung dieser an sich interessanten Wicklungsanordnung kann daher nicht empfohlen werden.

Eine schleichende Wicklung für kombinierte Dreieck- und Sternschaltung erhält man, wenn man nach Hobart die Polpaarzahl

$$2p = a(2m \pm 1)$$

und die gesamte Spulenzahl gleich $2am$ wählt.[1]) In Fig. 89 ist eine derartige Wicklung mit 12 Spulen und 10 Polen dargestellt.

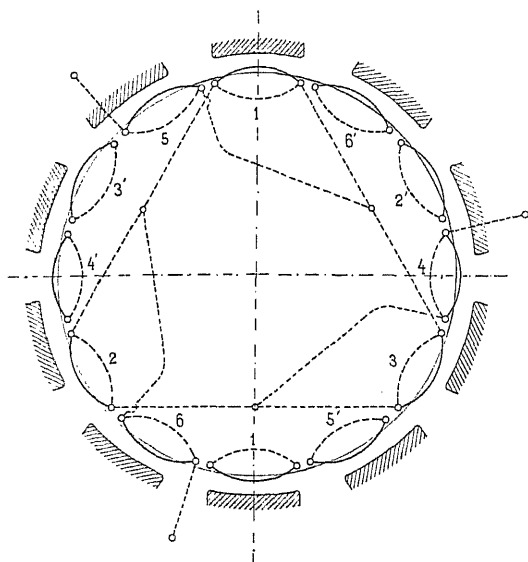



Fig. 89. Schleichende Wicklung von Hobart.

Der Deutlichkeit halber ist nur die Hälfte der Verbindungen eingezeichnet. Die Spulen 1, 3, 5 sind in Dreieck und die Spulen 2, 4, 6 in Stern geschaltet. Dreieck- und Sternspulen wechseln also am Umfange miteinander ab.

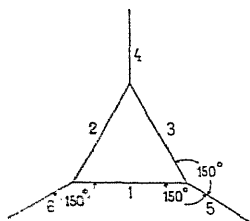



Fig. 89 a.

Der Spulenabstand beträgt

$$\frac{2p\tau}{2am} = \frac{2m \pm 1}{2m}\tau;$$

die Phasenverschiebung zweier aufeinanderfolgender Spulen wird also

$$\frac{2m \pm 1}{2m}\pi$$

Phasengrade. Im vorliegenden Falle wird sie 150°, so daß wir, wie Fig. 89a zeigt, ein vollständig symmetrisches System erhalten. Diese Wicklung hat in Bezug auf die Ankerrückwirkung die gleichen Nachteile wie die in Fig. 88 dargestellte.

[1]) Engl. Pat. 1897. 30264 H. M. Hobart.

7. Die umlaufenden Wicklungen.

Für Stabwicklungen, besonders wenn die Stäbe in den Nuten übereinander liegen, eignet sich die umlaufende Wicklung besser als die Spulenwicklung, weil keine besonderen Querverbindungen erforderlich sind. Ist die Zahl der Stäbe pro Pol und Phase gleich u_p, so macht die Wicklung einer Phase u_p Umläufe. — Die umlaufende Wicklung kommt insbesondere für niedere Spannungen in Betracht, bei hohen Spannungen würde entweder die Zahl der Umläufe oder die Spannung zwischen benachbarten Drähten einer Phase zu groß.

Die umlaufende Wicklung kann entweder mit ungleichen Wicklungsschritten und Verbindungsbogen oder mit gleichen Wicklungsschritten und Verbindungsgabeln ausgeführt werden.

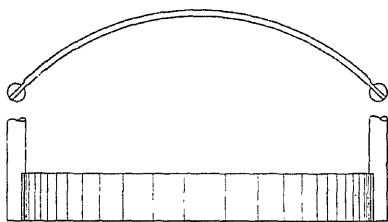



Fig. 90. Verbindungsbogen aus Kupferband.

Anstatt Verbindungsbogen oder -Gabeln anzuwenden, ist es auch möglich, die Stäbe in die Form der Windung zu biegen, so daß besondere Verbindungsstücke nicht nötig sind. Siehe z. B. Fig. 304 u. 305.

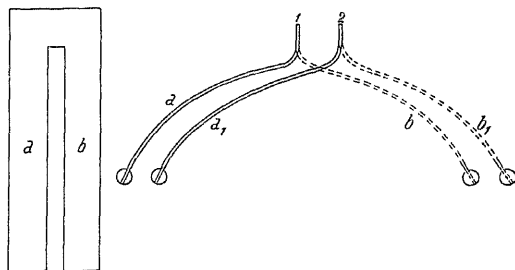



Fig. 91. Verbindungsgabel.

Der Verbindungsbogen besteht (Fig. 90) aus einem Kupferband, das an seinen Enden mit den zu verbindenden Stäben verlötet wird. Die Verbindungsgabel hat zwei Schenkel *a* und *b* (Fig. 91), diese

werden seitlich entsprechend dem Wicklungsschritt auseinandergebogen und mit den Stäben verbunden.

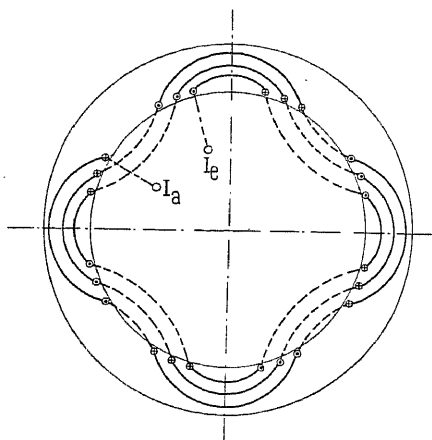



Fig. 92. Achtpolige umlaufende einphasige Dreilochwicklung.

Die Schenkel *a* und *b* liegen nun in verschiedenen Ebenen, so daß bei einer Kreuzung eine Berührung der Schenkel *a* und *b* nicht stattfindet.

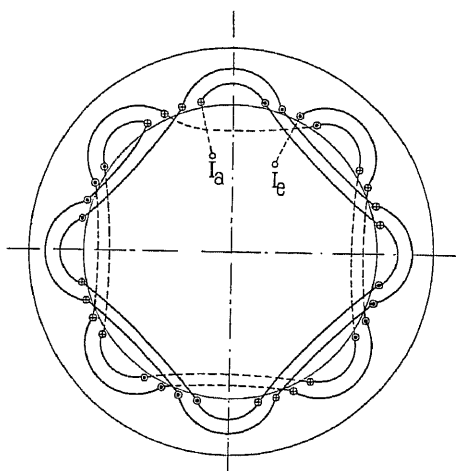



Fig. 93. Achtpolige umlaufende einphasige Vierlochwicklung mit gleichmäßig verteilten Verbindungen.

Umlaufende Einphasenwicklungen. Die Fig. 92 bis 94 stellen Stabwicklungen mit Verbindungsbogen dar. Im Schema 93

haben wir auf einer Seite der Armatur nur kurze, auf der andern Seite nur lange Verbindungsbogen. In Fig. 94[1]) sind die Stäbe in

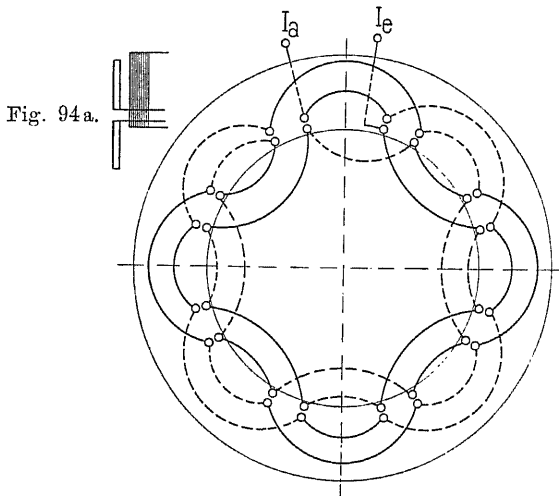



Fig. 94. Achtpolige umlaufende Zweilochwicklung mit zwei übereinanderliegenden Stäben pro Nut.

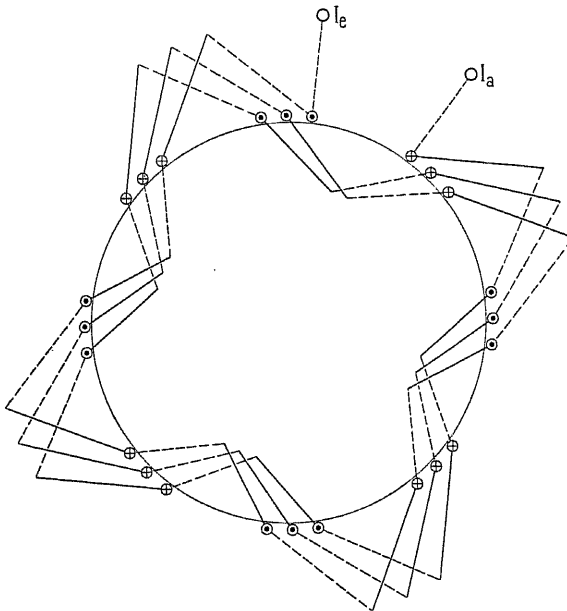



Fig. 95. Achtpolige umlaufende Dreilochwicklung mit Verbindungsgabeln.

[1]) In dieser Figur sind ausnahmsweise die nach außen abgebogenen Verbindungen nach außen und die nach innen abgebogenen nach innen

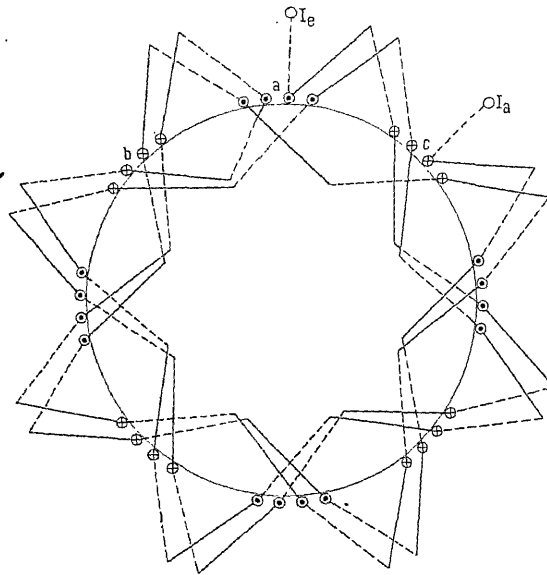



Fig. 96. Umlaufende Vierlochwicklung mit Umkehrung des Wicklungslaufes.

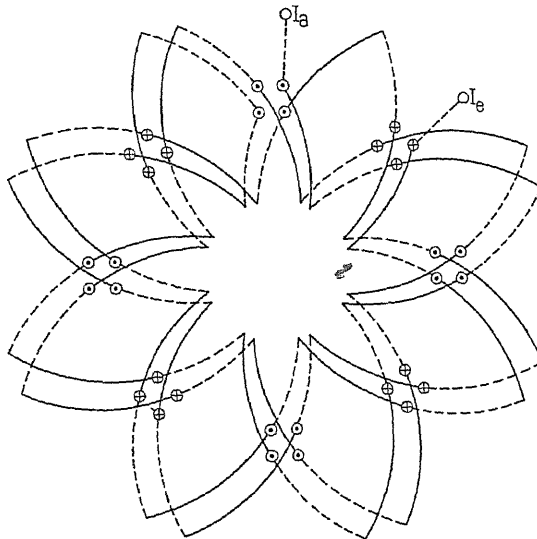



Fig. 97. Umlaufende Wicklung mit zwei Stäben pro Nut.

zwei Lagen übereinander und die Verbindungsbogen wie in Fig. 94a in einer Ebene angeordnet. Macht man die äußeren und inneren

gezeichnet. Die beiden Seiten der Wicklung sind durch ausgezogene und gestrichelte Linien unterschieden.

Stäbe verschieden lang, so können alle Verbindungsbogen nach außen oder innen gelegt und in zwei Ebenen angeordnet werden.

Ersetzen wir die Verbindungsbogen durch Verbindungsgabeln, so entstehen die Fig. 95 bis 97. Die Stäbe stehen über das Armatureisen mit verschiedener Länge vor, so daß stets ein langer Stab mit einem kurzen Stab verbunden ist.

Wenn wir in Fig. 96 zwei Umläufe gemacht haben, können wir anstatt von *a* nach *c* in demselben Sinne oder von *a* nach *b*

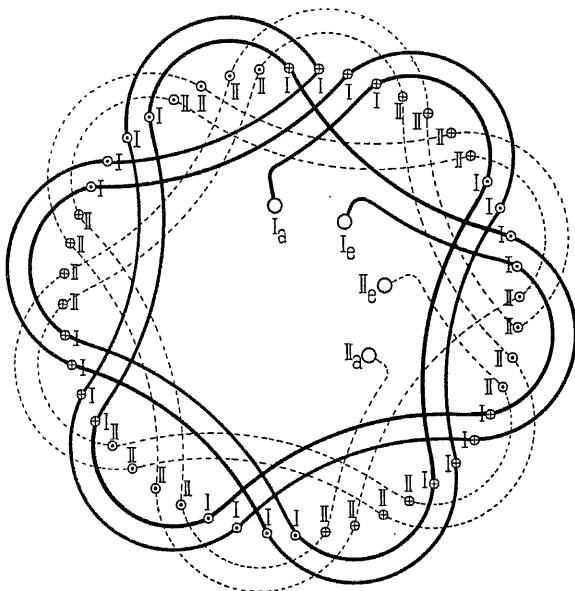



Fig. 98. Sechspolige umlaufende Zweiphasenwicklung mit vier Löchern pro Pol und Phase und Verbindungsbogen.

in entgegengesetztem Sinne weiter schreiten. Die Umkehrung des Wicklungslaufes ergibt eine gleichmäßigere Verteilung der Spulenköpfe.

In Fig. 97 liegen zwei Stäbe übereinander, und es ist auch hier von der Umkehrung des Wicklungslaufes Gebrauch gemacht.

Umlaufende Zweiphasenwicklungen. Eine Wicklung mit vier Löchern pro Pol und Phase und Verbindungsbogen stellt Fig. 98 dar. Sie entspricht der Verdoppelung des Schemas Fig. 93.

Führen wir diese Wicklung mit Verbindungsgabeln aus und machen ebenso wie in Fig. 98 von der Umkehrung des Wicklungslaufes Gebrauch, so entsteht das Schema Fig. 99, das eine schöne Verteilung der Gabeln aufweist. —

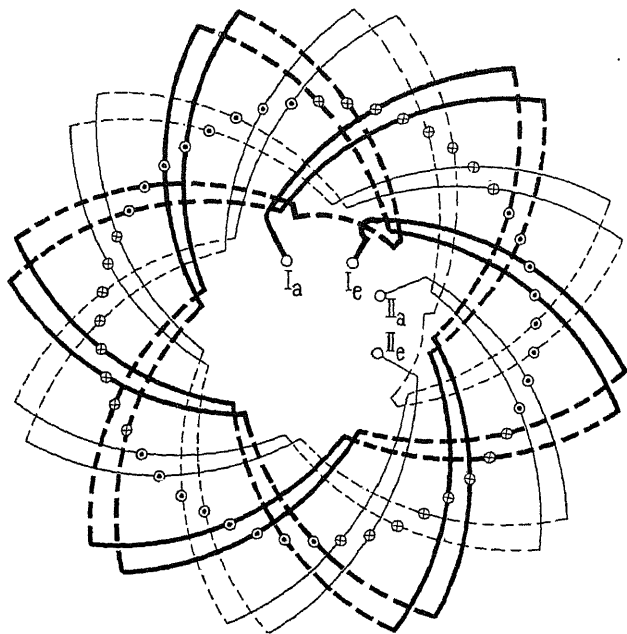



Fig. 99. Zweiphasige, umlaufende Vierloch-Stabwicklung mit Verbindungsgabeln.

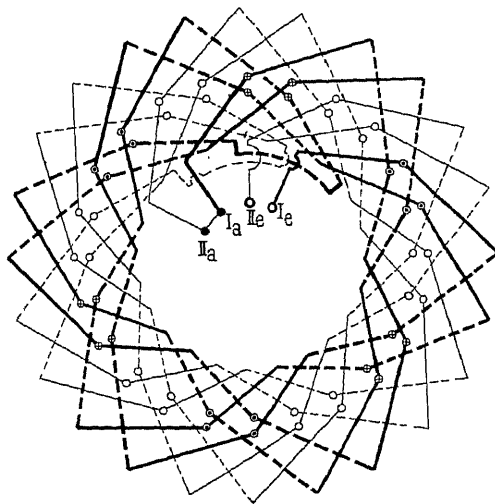



Fig. 100. Umlaufende, zweiphasige Zweilochwicklung mit zwei Stäben pro Loch.

Liegen die Stäbe in zwei Ebenen übereinander, so wählt man am besten Verbindungsgabeln, wie Fig. 100 zeigt.

Wir haben in diesem Schema 6 Pole und 4 Stäbe pro Pol und Phase. Gehen wir von Ia aus, so kehrt sich nach zwei Umläufen

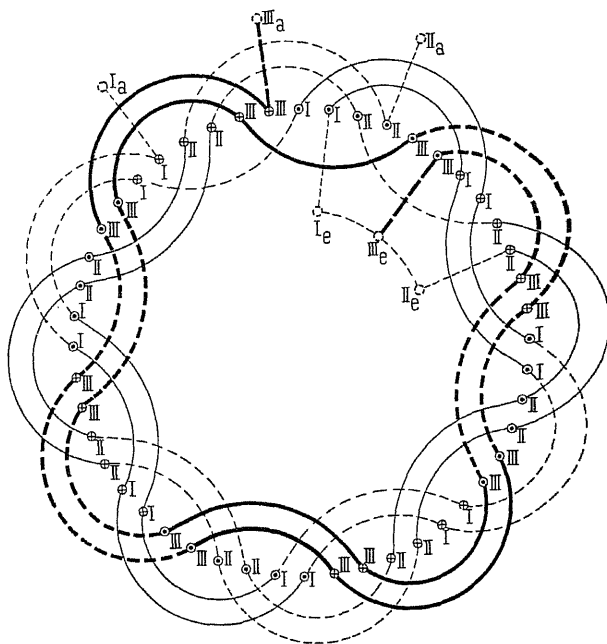



Fig. 101.

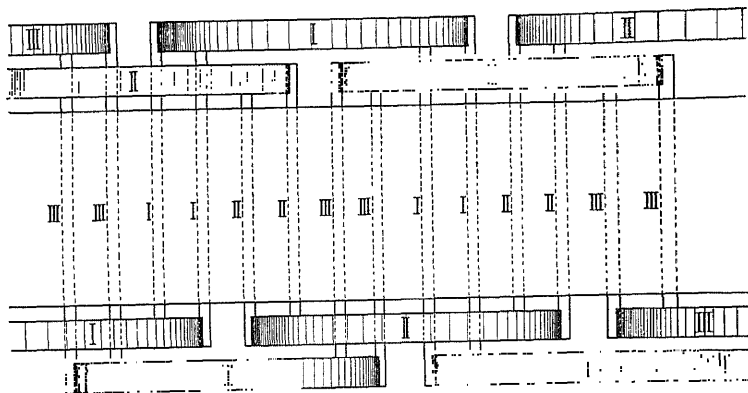



Fig. 102.

Fig. 101 und 102. Achtpolige umlaufende Zweiloch-Dreiphasenwicklung mit Verbindungsbogen.

der Lauf der Wicklung um, damit eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Verbindungsgabeln erhalten wird. Denken wir uns dieses Schema derart verdoppelt, daß vier Stäbe in einer Nut

übereinander liegen, so bekommen wir auf jeder Seite der Armatur zwei Systeme von Verbindungsgabeln, deren Zweige in vier Ebenen liegen.

Umlaufende Dreiphasenwicklungen. Das Schema einer achtpoligen Zweiloch-Dreiphasenwicklung und die Lage der Verbin-

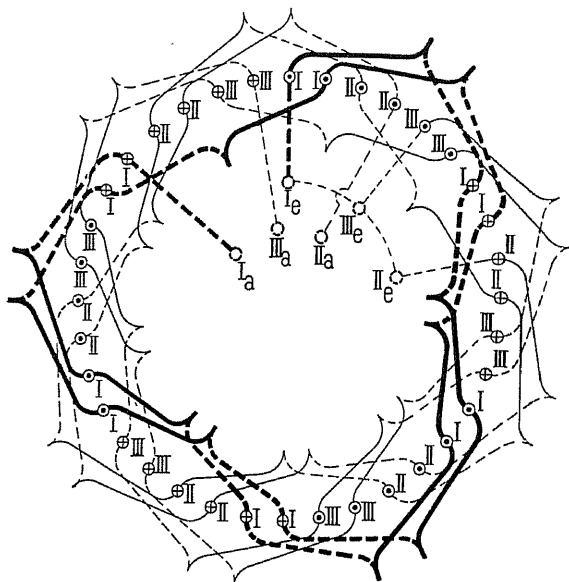



Fig. 103.

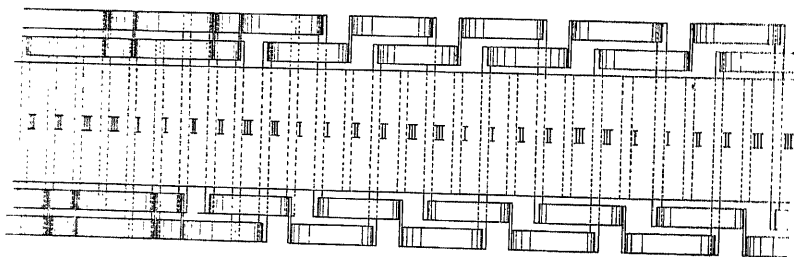



Fig. 104.

Fig. 103 und 104. Umlaufende Zweiloch-Dreiphasenwicklung mit Verbindungsgabeln.

dungsbogen im Grundriß sind in Fig. 101 und 102 gezeichnet. Wie aus dem Grundriß ersichtlich ist, haben die Stäbe ungleiche Längen.

Dieselbe Wicklung ist in Fig. 103 und 104 mit Verbindungsgabeln dargestellt, hier können alle Stäbe eine gleiche Länge bekommen.

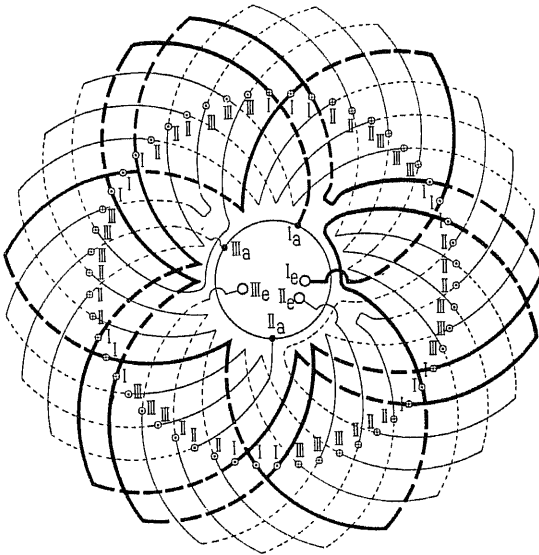



Fig. 105. Umlaufende Dreiloch-Dreiphasenwicklung mit Umkehrung des Wicklungslaufes.

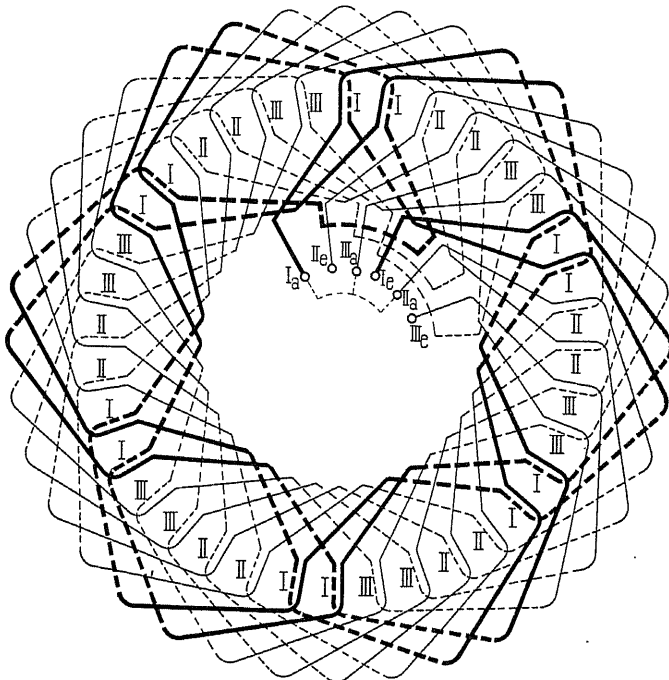



Fig. 106. Umlaufende Zweiloch-Dreiphasenwicklung mit zwei Stäben pro Nut und Umkehr des Wicklungslaufes.

Eine vollkommen gleichmäßige Verteilung der Verbindungsgabeln wird erhalten, wenn wir, wie im Schema Fig. 105 jede Phase zum Teil rechtsgängig und zum Teil linksgängig ausführen.

Haben wir zwei übereinander liegende Stäbe pro Nut, so läßt sich die Wicklung ebenfalls mit ganz gleichmäßig verteilten Verbindungsgabeln in zwei Ebenen ausführen, indem wir alle Stäbe einer Lage nach rechts und die anderen nach links abbiegen. Fig. 106 stellt ein solches Schema dar, die punktierten Stäbe bilden

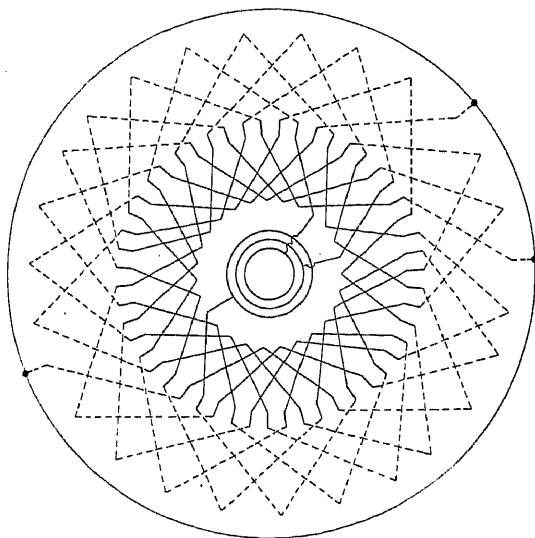



Fig. 107. Sechspolige dreiphasige Wicklung für die Rotoren von Asynchronmotoren. 17 Stäbe pro Phase.

die eine und die ausgezogenen die andere Lage. Eine Phase ist durch besonders starke Linien hervorgehoben. Die Umkehr im Laufe der Wicklung erfolgt nach zwei Umgängen.

Bei asynchronen Motoren ist es oft erwünscht, die Nutenzahl der sekundären und primären Wicklung derart zu wählen, daß das Verhältnis derselben kein ganzzahliges wird. Da die primäre Wicklung meistens eine Spulenwicklung ist, deren Nutenzahl ein Vielfaches der Polzahl darstellt, so können wir die gestellte Aufgabe lösen, wenn wir sekundär die Nutenzahl entsprechend wählen. In Fig. 107 ist eine sechspolige dreiphasige Wicklung mit 51 Stäben dargestellt, wir haben also 17 Stäbe pro Phase, die etwas ungleich auf die 6 Pole verteilt sind.

Drittes Kapitel.

Die unveränderten Gleichstromwicklungen.

8. Die Wicklungsformeln der geschlossenen Gleichstromwicklungen.

Jede Gleichstromwicklung läßt sich als Ein- oder Mehrphasenwicklung verwenden; wir haben nur diejenigen Knotenpunkte der Wicklung, welche den geforderten Phasendifferenzen entsprechen, aufzusuchen und mit Schleifringen zu verbinden. Die unveränderte Gleichstromwicklung kommt hauptsächlich bei Umformern, wo dieselbe Wicklung für die Erzeugung oder Aufnahme von Gleich- und Wechselstrom dient, in Betracht.

Die Gleichstromwicklungen werden eingeteilt in

1. Spiralwicklungen,
2. Schleifenwicklungen,
3. Wellenwicklungen.

Wir werden uns hauptsächlich mit den beiden letzten Gruppen befassen, da die Spiral- oder Ringwicklung nur sehr selten angewandt wird.

Die für die gebräuchlichen Schleifenwicklungen mit $a=p$ gültigen Schaltungsformeln lauten:[1])

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= \frac{s \pm b}{2p} \pm 2 \\ y_2 &= \frac{s \pm b}{2p} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

[1]) Siehe E. Arnold, Die Gleichstrommaschine, Jul. Springer, Berlin 1902, oder E. Arnold, Die Ankerwicklungen und Ankerkonstruktionen, Jul. Springer, Berlin 1899, wo die Gleichstromwicklungen besonders behandelt sind.

$$K = \frac{s}{2}$$

$$y = y_1 - y_2 = \pm 2$$

$$y_k = \frac{y_1 - y_2}{2} = \pm 1 \quad \ldots \ldots \quad (2)$$

Die Schaltungsregeln der Wellenwicklungen sind

$$y = y_1 + y_2 = \frac{s \pm 2a}{p} \quad \ldots \ldots \quad (3)$$

$$y_k = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{s \pm 2a}{2p} = \frac{K \pm a}{p} \quad \ldots \quad (4)$$

$$K = \frac{s}{2}.$$

Hierin bedeuten:

p die halbe Polzahl,

a die halbe Anzahl der Ankerstromzweige, bezw. die Anzahl der Stromzweige pro Phase,

s die Zahl der induzierten Spulenseiten oder die Stabzahl bei Stabwicklungen,

b eine ganze Zahl, welche $\frac{s \pm b}{2p}$ ganzzahlig und ungerade macht,

$K = \frac{s}{2}$ die Zahl der Knotenpunkte der Wicklung (bezw. die Zahl der Kollektorlamellen),

y_1 und y_2 die Teilschritte der Wicklung, oder die Zahl der Knotenpunktsteilungen, welche zwischen zwei zu verbindenden Drähten liegen,

y_1 und y_2 müssen ungerade ganze Zahlen sein.

y der resultierende Wicklungsschritt,

y_k der Kollektorschritt oder die Zahl der Kollektor- oder Knotenpunktsteilungen, welche zwischen zwei im Schema aufeinander folgenden Lamellen oder Knotenpunkten liegen.

Wollen wir einen m-phasigen Strom der Wicklung entnehmen oder in sie einführen, so müssen je zwei aufeinander folgende Ankerstromzweige in m gleiche Teile geteilt werden. Ein solcher Teilpunkt ist dann ein Anschlußpunkt für die m-phasige Wicklung und es bedeutet dann m zugleich die Zahl der Schleifringe oder die Zahl der Anschlußpunkte im zweipoligen Schema, d. h. es ist für Einphasenstrom $m = 2$, Dreiphasenstrom $m = 3$, Vierphasenstrom $m = 4$ und Sechsphasenstrom $m = 6$.

Die Erzeugung eines Zweiphasenstromes ergibt nach Fig. 109 eine Vierphasenschaltung und es ist daher auch in diesem Fall $m = 4$.

Die Drähte einer Phase bedecken $\frac{2}{m}$ des Ankerumfanges, es ist somit für die unveränderten Gleichstromwicklungen allgemein

$$\frac{\text{Spulenbreite}}{\text{Polteilung}} = \frac{2}{m}.$$

Aus zwei Ankerstromzweigen einer Gleichstromwicklung entsteht nur je ein Stromzweig pro Phase einer Wechselstromwicklung, so daß für Mehrphasenstrom a die Anzahl der Stromzweige pro Phase wird.

Damit in der geschlossenen Wicklung keine inneren Ströme entstehen (abgesehen von den Strömen $3 \cdot n$facher Ordnung, falls solche erzeugt werden, s. Seite 17), ist es erforderlich, daß die Drahtzahlen aller Phasen unter sich gleich sind, es muß also ganz allgemein die Stabzahl z pro Zweig und Phase

$$z = \frac{s}{m \cdot a} = \text{einer ganzen Zahl} \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

sein.

Wenn möglich soll $\frac{s}{m \cdot a}$ eine gerade Zahl oder $\frac{z}{2} = \frac{K}{ma} = \frac{s}{2\,ma}$ = einer ganzen Zahl sein, es liegen dann alle Verbindungen zu den Schleifringen auf derselben Seite des Ankers.

Aus Gleichung (4) folgt

$$y_k = \frac{m \cdot a \cdot z \pm 2a}{2p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

wo m, a und z solche ganze Zahlen sein müssen, daß y_k ganzzahlig und $m \cdot a \cdot z$ eine gerade Zahl wird, denn $K = \frac{s}{2} = \frac{m \cdot a \cdot z}{2}$ muß für eine Gleichstromwicklung ganzzahlig sein.

Da wir a Stromzweige pro Phase erhalten, so ist die Zahl der Knotenpunkte der Wicklung oder die Zahl der Lamellen, welche mit einem Schleifring (bei Umformern) oder mit einer Klemme verbunden werden dürfen ganz allgemein gleich a, d. h. a Knotenpunkte haben immer ein gleiches Potential und jeder Schleifring ist zugleich eine Äquipotentialverbindung.

Die Lage derjenigen Knotenpunkte, welche miteinander verbunden werden dürfen, wird durch die Schaltungsformel der

Äquipotentialverbindungen bestimmt, welche der Verfasser aufgestellt hat.[1])

Bezeichnet y_p einen Potentialschritt, d. h. die Zahl der Knotenpunktsteilungen, die zwischen zwei im Schema aufeinanderfolgenden Knotenpunkten von gleichem Potential liegen, so muß y_p ein ganzes Vielfaches der doppelten Polteilung $\frac{K}{p}$ sein, weil gleiche Potentiale unter gleichnamigen Polen liegen.

Bezeichnet daher K die Zahl der Knotenpunkte und x eine ganze Zahl, so ist allgemein

$$y_p = x \cdot \frac{K}{p}$$

Haben wir z. B. eine 6polige Schleifenwicklung ($p = 3$) mit $K = 90$ Lamellen, so ist $\frac{K}{p} = 30$. Ferner ist für Schleifenwicklungen $a = p$, es sind daher je drei Lamellen, die um 30 Lamellenteilungen voneinander entfernt sind, mit einem Schleifring zu verbinden. Die drei Potentialschritte y_{p1}, y_{p2} und y_{p3} sind einander gleich und es ist, da die Anzahl der doppelten Polteilungen gleich p und die Zahl der Potentialschritte gleich a,

$$x = \frac{p}{a}.$$

Für Schleifenwicklungen wird $x = 1$.

Die Verbindungen von a Knotenpunkten bilden immer eine geschlossene Figur, d. h. es ist

$$y_{p1} + y_{p2} + y_{p3} \ldots + y_{pa} = K.$$

Die Anzahl der Werte x ist gleich a und es muß daher

$$x_1 + x_2 + x_3 \ldots + x_a = p \text{ sein.}$$

Diese Bedingungen gelten auch für Wellenwicklungen. Bei der einfachen Reihenschaltung ist $a = 1$, es darf daher mit einem Schleifring nur ein Knotenpunkt der Wicklung verbunden werden. Für die Reihenparallelschaltung des Verfassers ist dagegen $a > 1$. Für diese haben wir nach Gleichung (4)

$$y_k = \frac{K}{p} \pm \frac{a}{p}, \text{ woraus } \frac{K}{p} = y_k \mp \frac{a}{p}$$

und

$$y_p = x \cdot \frac{K}{p} = x\, y_k \mp x \cdot \frac{a}{p} \quad \ldots\ldots \quad (8)$$

[1]) Siehe E. Arnold, Die Gleichstrommaschine, und ETZ 1902. D.R.P. No. 126872.

Wenn nun $\frac{p}{a}$ keine ganze Zahl ist, so können nicht alle Werte von x und daher auch nicht alle Werte von y_p einander gleich sein. Es ist jedoch zweckmäßig, y_p gleich einer ganzen Zahl zu machen, auch wenn $x \cdot \frac{a}{p}$ nicht ganzzahlig ist, sonst fallen nicht alle Anschlußpunkte mit Knotenpunkten zusammen.

Damit jeder aus der Formel berechnete Wert von y_p möglichst ganzzahlig, d. h. die Abweichung von dem genau richtigen Potentialschritt möglichst klein wird, machen wir x möglichst gleich $\frac{p}{a}$, so daß zwei Werte von x höchstens um 1 verschieden sind.

Wenn wir diese Bedingung einhalten, so wird immer $x \cdot \frac{a}{p}$ gleich 1 oder nahezu gleich 1, und wir erhalten aus Formel (9) sofort die ganzzahligen Werte y_p, wenn wir

$$x \cdot \frac{a}{p} = 1 \text{ einsetzen.}$$

Die Abweichung des Schrittes y_p vom richtigen Werte ist dann

$$\alpha_x = 1 - x \cdot \frac{a}{p} \quad \ldots \quad (9)$$

und wir erhalten

$$\left.\begin{aligned} y_{p1} &= x_1 \cdot y_k \mp 1 \\ y_{p2} &= x_2 \cdot y_k \mp 1 \\ &\ldots\ldots \\ &\ldots\ldots \\ y_{pa} &= x_a \cdot y_k \mp 1 \end{aligned}\right| \quad \text{wobei} \quad y_k = \frac{maz \pm 2a}{2p} \quad \ldots \quad (10)$$

Auf die Vorzeichen ist zu achten. Wählen wir in der Formel für y_k das $+$-Zeichen, so gilt für die Werte y_p das $-$-Zeichen.

Der Fehler α_x soll möglichst klein sein. Wenn α_x nicht gleich Null, so haben die leitend verbundenen Punkte kein genau gleiches Potential und wir erhalten Ausgleichströme zwischen den einzelnen Stromzweigen.

Man kann α_x stets gleich Null machen, wenn man die aus Formel (8) berechneten Potentialschritte genau ausführt. Die Anschlußpunkte fallen dann nicht immer mit Knotenpunkten der Wicklung zusammen, sondern nur dann, wenn die Schritte y_p ganze Zahlen oder ganze Zahlen $+\frac{1}{2}$ sind; in letzterem Falle fällt ein

Teil der Anschlußpunkte mit vorderen und ein Teil mit hinteren Knotenpunkten zusammen. Ist dagegen y_p kein ganzes Vielfaches von $\frac{1}{2}$ so liegen die betreffenden Anschlußpunkte zwischen zwei aufeinanderfolgenden Knotenpunken.

Ferner wird der Fehler $a_x = 0$, wenn $\frac{p}{a}$ gleich einer ganzen Zahl ist und man $x = \frac{p}{a}$ macht.

Für Umformer wurden bis jetzt fast immer Schleifenwicklungen oder einfache Reihenwicklungen benutzt, weil die Ausgleichverbindungen für die Reihenparallelschaltung nicht bekannt waren.

Wir wollen nun als Beispiel zu den angegebenen Formeln einige Schemas entwerfen.

9. Die Ring- und Schleifenwicklungen.

In den Fig. 108 bis 110 ist zunächst dargestellt, wie der Anker eines Umformers mit einer Ringwicklung an das Wechselstromnetz

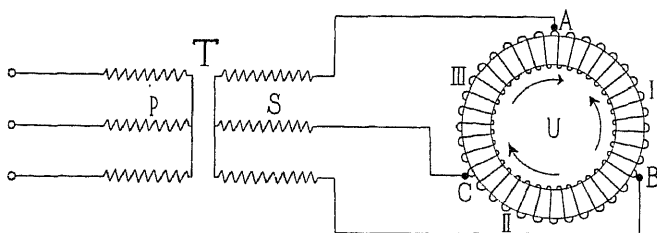



Fig. 108. Schaltung eines Dreiphasen-Umformers.

angeschlossen wird. Der Einfachheit wegen sind in den Figuren die Schleifringe und Kollektoren fortgelassen und die Ankerwicklung ist direkt mit den Leitungen verbunden.

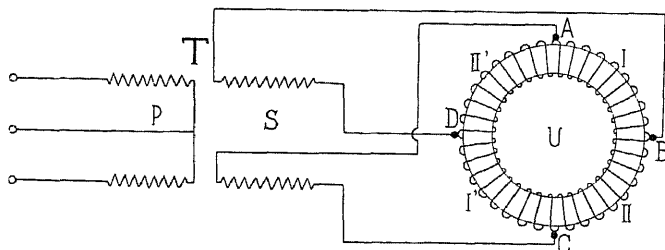



Fig. 109. Schaltung eines Vierphasen-Umformers.

Da zwischen der geforderten Gleichstromspannung und der Wechselspannung des Umformers ein bestimmtes Verhältnis besteht

(siehe Abschnitt 42), so muß die Linienspannung mittels eines Transformators T mit Primärwicklung P und Sekundärwicklung S auf die gewünschte Spannung transformiert werden.

Fig. 108 veranschaulicht die Schaltung eines Dreiphasen-Umformers, der an einen Dreiphasen-Transformator angeschlossen ist.

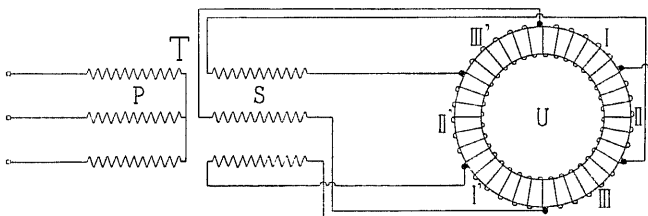



Fig. 110. Schaltung eines Sechsphasen-Umformers.

Ist der Linienstrom ein Zweiphasen- oder Vierphasenstrom, so erhalten wir, wie Fig. 109 zeigt, einen Vierphasen-Umformer.

Das Schema eines Sechsphasen-Umformers mit einem Dreiphasen-Transformator gibt Fig. 110.

Die dargestellten Verbindungsarten mit den Transformatoren sind auch für die Schleifringe von Schleifen- und Wellenwicklungen gültig.

Schleifenwicklungen. In Fig. 111 ist eine Schleifenwicklung für die Werte:

$$s = 54, \quad p = a = 3 \begin{cases} y_1 = \dfrac{54 - 0}{6} - 2 = 7 \\ y_2 = \dfrac{54 - 0}{6} = 9 \end{cases}$$

dargestellt. Die Stäbe sind fortlaufend numeriert. Es ist

Stab 1 mit Stab $1 + y_2 = 1 + 9 = 10$
„ 10 „ „ $1 - y_1 = 10 - 7 = 3$
„ 3 „ „ $3 + y_2 = 3 + 9 = 12$
„ 12 „ „ $12 - y_1 = 12 - 7 = 5$ u. s. f.

verbunden.

Wollen wir aus dieser Gleichstromwicklung, ohne an derselben etwas zu ändern, z. B. eine dreiphasige Wicklung machen, so erhält eine Phase der Drehstromwicklung je

$$\frac{s}{ma} = \frac{54}{3 \cdot 3} = 6$$

hintereinander geschaltete Stäbe.

Gehen wir also in Fig. 111 vom Stabe 1 aus und wählen wir für die Phasen die in der Nebenfigur angegebenen Bezeichnungen, so durchlaufen wir von A_1 bis B_1 6 Stäbe der Phase I, dann von B_1 bis C_1 6 Stäbe der Phase II, und von C_1 bis A_2 6 Stäbe der Phase III. Bei A_2 beginnt wieder die Phase I u. s. f. Wir erhalten im ganzen 3 oder allgemein a Anschlußpunkte für jede Phase, und a Spulen- oder Stabgruppen sind pro Phase parallel geschaltet.

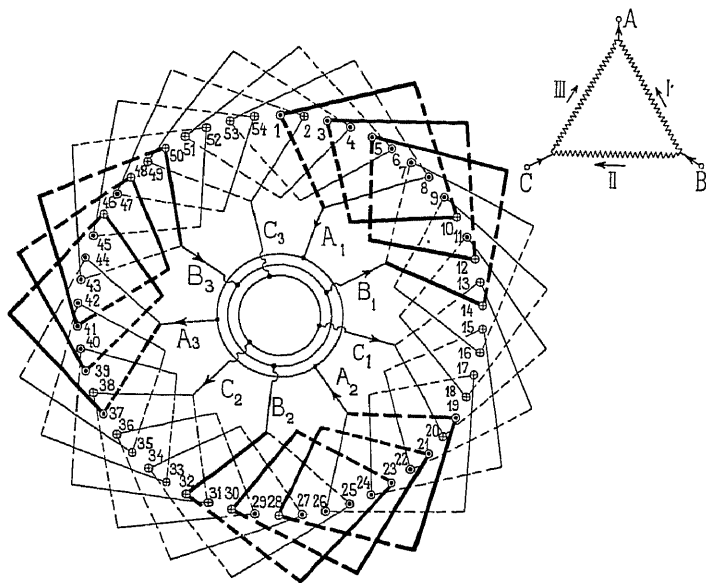



Fig. 111. Dreiphasige geschlossene Schleifenwicklung mit $s = 54$, $p = a = 3$.

Die Entfernung von zwei aufeinander folgenden Anschlußpunkten ist

$$= \frac{K}{m \cdot p} = \frac{s}{2\,mp} = \frac{54}{18} = 3$$

Knotenpunktsteilungen und zwei Anschlußpunkte eines Ringes liegen um

$$y_p = \frac{K}{p} = \frac{s}{2p} = \frac{54}{6} = 9$$

Knotenpunktsteilungen auseinander.

Die angenommene Stromrichtung entspricht den Pfeilen in der Nebenfigur. Wir sehen, daß die Stäbe einer Phase nicht beisammen liegen, sondern daß immer ein Draht einer anderen Phase dazwischen liegt. Das ist bei unveränderten Gleichstromwicklungen immer der Fall. Es sind daher die Drähte einer Phase allgemein über $\frac{2}{m}$tel des Ankerumfanges verteilt.

Bezeichnet daher S den durchschnittlich pro Pol von einer Phase bedeckten Bogen und τ die Polteilung, so ist für einen Dreiphasen-Umformer

$$\frac{S}{\tau} = \frac{2}{3}.$$

Wie wir später sehen werden, hat dieses Verhältnis Einfluß auf die Größe der in der Wicklung induzierten EMK.

Ein Beispiel (ohne Figur) für die Wicklung eines Vierphasen-Umformers geben folgende Zahlen:

$$s = 84 \qquad p = a = 3 \qquad m = 4 \qquad K = \frac{s}{2} = 42$$

$$y_1 = \frac{84 + 6}{6} - 2 = 13$$

$$y_2 = \frac{84 + 6}{6} = 15.$$

Es wird

$$\frac{S}{\tau} = \frac{2}{m} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{s}{m \cdot a} = \frac{84}{4 \cdot 3} = 7$$

$$\frac{K}{mp} = \frac{42}{12} = 3\tfrac{1}{2}$$

$$\frac{K}{p} = \frac{42}{3} = 14.$$

Wir erhalten im ganzen $m \cdot a = 12$ Stabgruppen. Der 1te, $(1 + m)$te $= 5$te, $(5 + m)$te $= 9$te Teilpunkt ist mit Schleifring A, der 2te, 6te und 10te mit Schleifring B, der 3te, 7te und 11te mit Schleifring C, und der 4te, 8te und 12te mit Schleifring D zu verbinden.

Da $\frac{s}{ma}$ ungerade bezw. $\frac{K}{mp}$ ein ungerades Vielfaches von $\frac{1}{2}$ ist, liegen die Anschlußpunkte mit geraden Nummern auf der einen und die mit ungeraden Nummern auf der andern Seite der Wicklung. Zwischen je zwei Anschlußpunkten eines Schleifenringes liegen 14 Knotenpunktsteilungen.

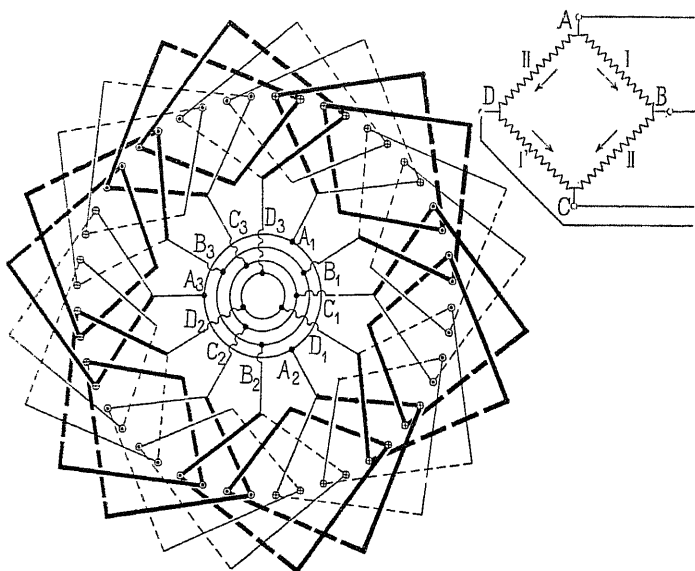



Fig. 112. Sechspolige vierphasige geschlossene Schleifenwicklung, bei der alle Abzweigpunkte auf derselben Seite liegen.

Eine **Vierphasenwicklung**, bei der alle Abzweigpunkte auf der gleichen Seite liegen, ist in Fig. 112 dargestellt. Hier ist nämlich

$$s = 48 \quad p = a = 3\,,$$

also

$$\frac{s}{m \cdot a} = \frac{48}{4 \cdot 3} = 4$$

eine gerade Zahl.

Der Wicklungsschritt wird

$$y_1 = \frac{48 - 6}{6} + 2 = 9$$

$$y_2 = \frac{48 - 6}{6} = 7\,.$$

Die Phasen I und I' sind stärker ausgezogen, als die anderen beiden zusammengehörigen Phasen. Wie man sieht, liegen hier die Stäbe der Phasen I, I', sowie der Phasen II, II' direkt nebeneinander auf der einen Hälfte der Polteilung. Das ist, wenn *m* gerade ist, immer der Fall, jedoch liegen auch hier zwischen den Drähten der Phase I bezw. II Drähte der Phase I' bezw. II'.

10. Die Wellenwicklungen.

Einfache Reihenschaltung. In Fig. 113 ist eine einfache Reihenschaltung ($a = 1$) aufgezeichnet und zwar für

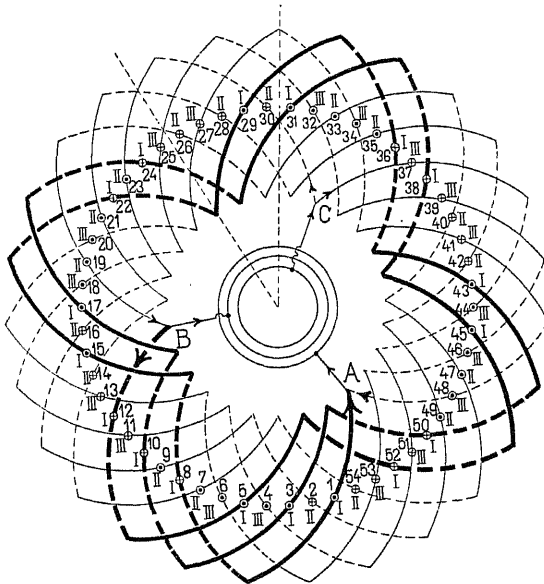



Fig. 113. Achtpolige dreiphasige Wicklung mit Reihenschaltung $a = 1$.

$$s = m \cdot a \cdot z = 3 \cdot 1 \cdot 18 = 54, \quad p = 4$$

$$y_1 + y_2 = \frac{54 + 2}{4} = 14$$

$$y_1 = y_2 = 7 \qquad y_k = \frac{y_1 + y_2}{2} = 7\,.$$

Die Stäbe sind auf der inneren Seite im Schema fortlaufend numeriert; es ist

Stab 1 mit Stab $1 + y_1 = 1 + 7 = 8$
„ 8 „ „ $8 + y_2 = 8 + 7 = 15$
„ 15 „ „ $15 + y_1 = 15 + 7 = 22$ u. s. f.

zu verbinden.

Die Wicklung hat nun zwei ($= 2a$) Ankerstromzweige. Wollen wir ihr einen Drehstrom entnehmen oder zuführen, so finden wir die Anschlußpunkte wie folgt. Es ist

$$\frac{s}{m \cdot a} = \frac{54}{3 \cdot 1} = 18 .$$

Wir gehen von irgend einem Punkte A der Wicklung aus, durchlaufen 18 Stäbe, die wir mit der Zahl I versehen, und gelangen bei B zum Anfang der Phase II, durchlaufen wieder 18 Stäbe, die wir mit der Zahl II versehen, und gelangen zum Punkte C zwischen C und A liegt schließlich die Phase III. Wir sehen, daß die Drähte einer Phase nicht benachbart sind, es ist wieder

$$\frac{S}{\tau} = \frac{2}{m} = \frac{2}{3} .$$

Die Abzweigungen A, B, C können wir noch einfacher finden. Die Zahl der Knotenpunkte ist

$$K = \frac{s}{2} = \frac{54}{2} = 27$$

und zwischen je zwei Abzweigungen liegen $\frac{K}{m} = 9$ Knotenpunktsteilungen. Ist $\frac{K}{m}$ keine ganze Zahl, so fällt eine Abzweigung auf die andere (äußere) Seite der Wicklung.

Bei zweiphasigem Linienstrom erhalten wir, wie erwähnt, eine vierphasige Wicklung. In Fig. 114 ist eine Reihenschaltung aufgezeichnet für

$$p = 3, \qquad a = 1, \qquad s = m \cdot a \cdot z = 4 \cdot 1 \cdot 11 = 44$$

$$y_1 + y_2 = \frac{s - 2a}{3} = \frac{44 - 2}{3} = 14$$

$$y_1 = y_2 = 7 \quad y_k = \frac{y_1 + y_2}{2} = 14 .$$

Wir durchlaufen, von irgend einem Punkte A der Wicklung ausgehend, 11 Stäbe, die wir mit I bezeichnen, und kommen zum Abzweigpunkt B; nach je 11 weiteren Stäben II bezw. I′ erhalten wir die Abzweigungen C und D und kehren schließlich über die Stäbe II′ nach A zurück. Da die Stabzahl $z = \frac{s}{m \cdot a}$ ungerade ist, liegen die Abzweigungen B und D auf der andern Seite des Ankers.

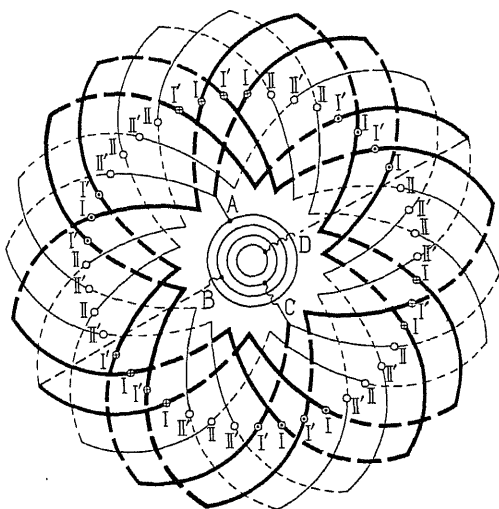



Fig. 114. Sechspolige vierphasige Wicklung mit Reihenschaltung.

Da m gerade ist, liegen die Stäbe der zusammengehörigen Phasen I, I′ und II, II′ nebeneinander.

Reihenparallelschaltung. Es sollen hierfür drei Beispiele gegeben werden.

Erstes Beispiel. Als erstes Beispiel wählen wir eine Wicklung mit

$$p = 4, \qquad a = 2, \qquad s = 3 \cdot 2 \cdot 10 = 60$$

$$y_1 + y_2 = \frac{60 - 2 \cdot 2}{4} = 14, \qquad K = \frac{s}{2} = 30$$

$$y_1 = y_2 = 7, \qquad y_k = 7, \qquad z = 10\,.$$

Wir können nun (s. Fig. 115), wie früher, von irgend einem Punkte A_1 ausgehen und gelangen dann nach je 10 durchlaufenen Stäben der Reihe nach zu den Punkten B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, welche paarweise an die Schleifringe angeschlossen sind.

Die Zahl der Knotenpunktsteilungen, die zwischen zwei zu demselben Ringe führenden Anschlußpunkten liegt, ist gleich

$$y_p = x \cdot y_k \mp 1 .$$

In unserem Falle ist

$$x_1 = 2 \qquad x_2 = 2 \qquad x_1 + x_2 = p = 4$$

$$y_{p1} = y_{p2} = 2 \cdot 7 + 1 = 15$$

und zwischen zwei aufeinander folgenden Anschlußpunkten verschiedener Phasen liegen $\frac{y_p}{m} = \frac{15}{3} = 5$ Knotenpunktsteilungen.

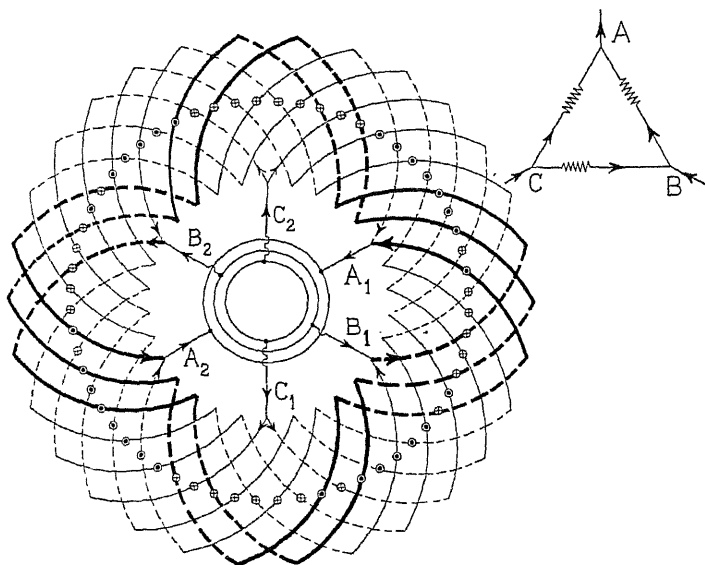



Fig. 115. Achtpolige dreiphasige Wicklung mit Reihenparallelschaltung $a = 2$.

Zweites Beispiel. Es sei

$$p = 4, \qquad a = 3, \qquad m = 3, \qquad z = 6$$

$$s = 3 \cdot 3 \cdot 6 = 54, \qquad K = 27$$

$$y_1 + y_2 = \frac{54 - 6}{4} = \frac{48}{4} = 12$$

$$y_1 = 5, \qquad y_2 = 7, \qquad y_k = 6 .$$

Das Schema ist in Fig. 116 dargestellt. Da y_k und K den gemeinschaftlichen Teiler 3 haben, so ist die Wicklung dreifach geschlossen.

Für die Potentialschritte finden wir

$$x_1 = 1, \qquad x_2 = 1, \qquad x_3 = 2$$

$$y_{p1} = 1 \cdot 6 + 1 = 7$$
$$y_{p2} = 1 \cdot 6 + 1 = 7$$
$$y_{p3} = 2 \cdot 6 + 1 = 13$$

$$y_{p1} + y_{p2} + y_{p3} = 27 = K.$$

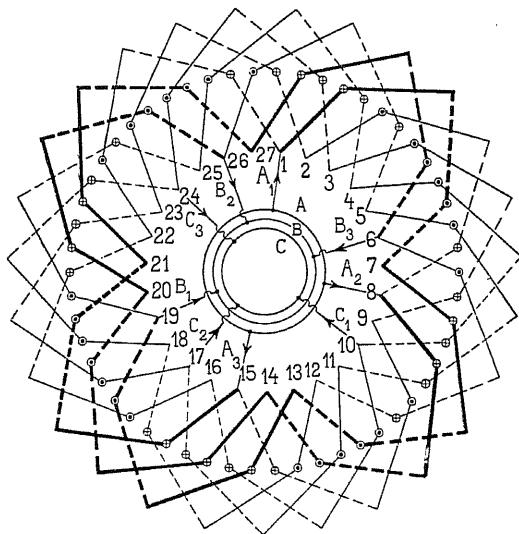



Fig. 116. Dreiphasige dreifach geschlossene Wicklung mit Reihenparallelschaltung $a = 3$.

Wir schreiben nun das Wicklungsschema auf, indem wir p vertikale Kolonnen machen und die 27 Knotenpunkte in drei Gruppen einteilen. Am Anfang der drei Gruppen stehen die Zahlen 1, ferner $1 + y_{p1} = 1 + 7 = 8$ und $1 + y_{p1} + y_{p2} = 8 + 7 = 15$. In den horizontalen Reihen stehen die Zahlen 1, $1 + y_k$, $1 + 2y_k$, $1 + 3y_k$ u. s. f.

1	7	13	19
25	4	10	16
22	1		
8	14	20	26
5	11	17	23
2	8		
15	21	27	6
12	18	24	3
9	15		

Indem wir nun die erste Gruppe in drei (m) gleiche Teile teilen, finden wir die unterstrichenen Zahlen 1, 19, 10. Diese und die symmetrisch liegenden Zahlen der anderen Gruppen sind die Punkte gleichen Potentials. Es sind also anzuschließen an

Schleifring	*A.*	die Punkte	1,	8,	15
„	*B.*	„ „	19,	26,	6
„	*C.*	„ „	10,	17,	24.

Im Schema sind die Verbindungen eingezeichnet.

Das reduzierte Schema,[1]) in dem die Spulen in der Reihenfolge der Tabelle aufeinander folgen und das $= a = 3$ Polpaare besitzt, ist in Fig. 117 aufgezeichnet.

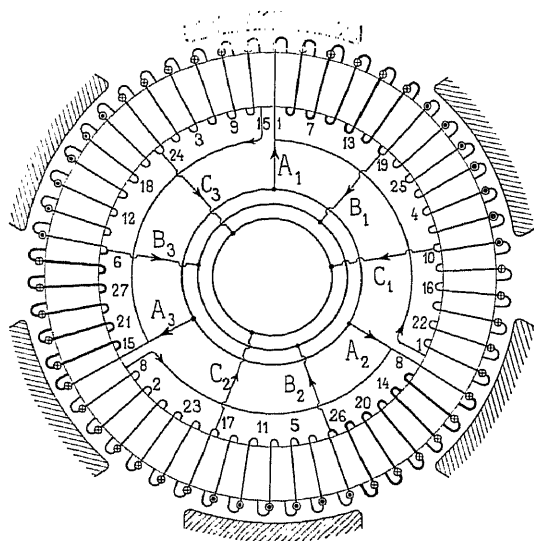



Fig. 117. Reduziertes Schema für Schaltung Fig. 116.

Drittes Beispiel. Für die Anwendung der Reihenparallelschaltung bei zweiphasigen Wicklungen gibt Fig. 118 ein Beispiel. Hier ist

$$p = 3, \qquad a = 3, \qquad m = 4, \qquad z = 5$$

$$s = 3 \cdot 4 \cdot 5 = 60, \qquad K = 30$$

$$y_1 + y_2 = \frac{60 - 6}{3} = 18$$

$$y_1 = y_2 = 9, \qquad y_k = 9\,.$$

---

[1]) Siehe E. Arnold, Die Gleichstrommaschine. Bd. I. Seite 46.

Da 9 und 30 den gemeinschaftlichen Teiler 3 haben, ist die Wicklung dreifach geschlossen. Jeder Schleifring ist mit jedem der drei Wicklungsteile zu verbinden; die Bestimmung der Anschlußpunkte wird wieder mit Hilfe der Gesetze für die Äquipotentialverbindungen vorgenommen. Wir erhalten:

$$y_k = 9\,, \qquad x_1 = 1\,, \qquad x_2 = 1\,, \qquad x_3 = 1$$

$$y_{p1} = 1 \cdot 9 + 1 = 10$$
$$y_{p2} = 1 \cdot 9 + 1 = 10$$
$$y_{p3} = 1 \cdot 9 + 1 = 10$$
$$y_{p1} + y_{p2} + y_{p3} = 30\,K.$$

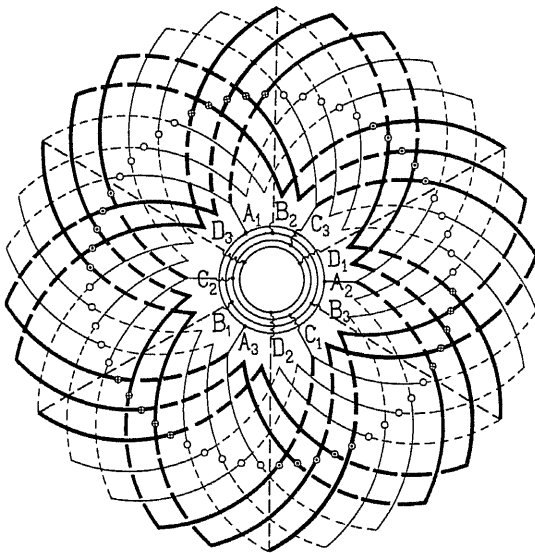



Fig. 118. Vierphasige dreifach geschlossene Wicklung mit Reihenparallelschaltung $a = 3$.

Wir müssen also vom Anschlußpunkte A_1 der ersten Wicklung um 10 Teilungen am Umfang weiter gehen, um nach A_2, dem entsprechenden Punkte der zweiten Wicklung, zu gelangen und ebenso um 10 Teilungen weiter, um A_3 zu finden. Zwischen zwei aufeinander folgenden Abzweigungen zu den Schleifringen liegen $\frac{K}{m \cdot p} = \frac{30}{4 \cdot 3} = 2\frac{1}{2}$ Knotenpunktsteilungen.

Wenn eine Wicklung für Erzeugung von m-Phasenstrom m-fach geschlossen ist, können wir die Verbindungen zu den Schleifringen noch anders ausführen. Wir benutzen jeden einfach geschlossenen Teil der Wicklung als Einphasenwicklung und schalten die m in sich geschlossenen Wicklungen in Stern oder in Dreieck. Hierbei kann jeder geschlossene Teil der Wicklung eine Wellenwicklung mit $a = 1$ oder $a > 1$ sein. Es ergibt sich also eine große Zahl von Kombinationen, die leicht zu entwerfen sind, wenn man die Gleichstromwicklungen kennt.

Viertes Kapitel.

Die aufgeschnittenen Gleichstromwicklungen.

11. Die aufgeschnittenen Spiralwicklungen. — 12. Die aufgeschnittenen Schleifenwicklungen. — 13. Die aufgeschnittenen Wellenwicklungen. — 14. Kombination aufgeschnittener und unveränderter Gleichstromwicklungen.

11. Die aufgeschnittenen Spiralwicklungen.

Wenn eine Gleichstromwicklung nicht an einen Kollektor angeschlossen zu werden braucht, dürfen wir sie aufschneiden.

Folgen wir dem Schema irgend einer Gleichstromwicklung, so wechselt der Strom $2a$-mal seine Richtung. Um daher z. B. eine Einphasenwicklung herzustellen, bei der alle Windungen in Serie geschaltet sind, müssen wir die Gleichstromwicklung an $2a$ Stellen aufschneiden und nach dem Schema

$$\circ - 1_a - 1_e \frown 2_e - 2_a \frown 3_a - 3_e \frown 4_e - 4_a - \bullet$$

wie Fig. 119 zeigt, verbinden, wenn 1_a, 2_a u. s. f. die Anfänge und 1_e, 2_e . . u. s. f. die Enden der Wicklungsteile bedeuten.

Fig. 119. Zweipolige einphasig aufgeschnittene Gleichstromwicklung.

Soll die Wicklung m-phasig werden und $\left(\frac{1}{m}\right)$tel aller Windungen der Gleichstromwicklung in Serie geschaltet sein, so kann sie entweder in $a \cdot m$ Teile oder in $2 \cdot a \cdot m$ Teile geteilt werden.

Wird die Gleichstromwicklung nur in $a \cdot m$ Teile geteilt, so bedecken die Drähte einer Phase $\frac{2}{m}$tel einer Polteilung, und es liegen zwischen den Drähten einer Phase jeweils noch Drähte der anderen

Phasen. Teilen wir dagegen die Wicklung in $2am$ Teile, so werden alle Drähte einer Phase benachbart und dieselben bedecken nur $\frac{1}{m}$-tel des Umfanges. Die in der Wicklung induzierte EMK wird in letzterem Falle, wenn m ungerade ist, größer.

Das ist auch der Grund, weshalb es besser ist, die Wicklung aufzulösen.

Für die gewöhnlichen Spiral- und Schleifenwicklungen ist $a=p$ und für Wellenwicklungen kann a eine beliebige ganze Zahl sein.

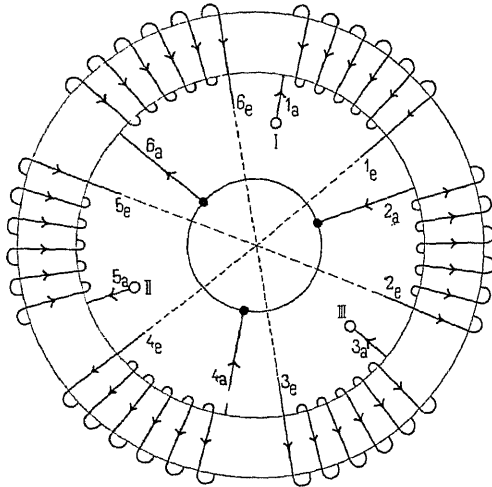



Fig. 120. Zweipolige dreiphasig aufgeschnittene Ringwicklung nach Schema B verbunden.

Die Regeln, nach welchen die Teile zu einer m-phasigen Wicklung zu verbinden sind, lassen sich am einfachsten mit Hilfe der Spiralwicklung feststellen.

Nehmen wir an, die in Fig. 120 dargestellte Wicklung gehöre zu einem zweipoligen Felde, so ist $2a = 2p = 2$. Wollen wir nun z. B. eine zweipolige dreiphasige Wicklung herstellen, so teilen wir die Windungen in $2am = 6$ gleiche Teile und bezeichnen die Enden derselben mit $1_a - 1_e$, $2_a - 2_e$, $3_a - 3_e$ u. s. f. bis $6_a - 6_e$.

Wir erhalten dann das Verbindungsschema

$$\left.\begin{array}{ll} \text{Phase I.} & \circ - 1_a - 1_e \frown 4_e - 4_a - \bullet \\ \text{Phase II.} & \bullet - 2_a - 2_e \frown 5_e - 5_a - \circ \\ \text{Phase III.} & \circ - 3_a - 3_e \frown 6_e - 6_a - \bullet \end{array}\right\} \text{Schema A.}$$

Innerhalb einer Polteilung τ bedecken die Drähte einer Phase nur $\frac{1}{3}\tau$.

Bezeichnen wir eine beliebige Spule mit x, so erhalten wir die Regel: Das Ende (Anfang) der $x$ten Spule ist mit dem Ende (Anfang) der $(x+m)$ten Spule zu verbinden.

Die drei Phasen können nun in Stern oder in Dreieck verbunden werden.

Für Sternschaltung erhalten wir das Schema

$$\left.\begin{array}{ll} \text{I.} & \circ - 1_a - 1_e \frown 4_e - 4_a - \bullet \\ \text{II.} & \circ - 5_a - 5_e \frown 2_e - 2_a - \bullet \\ \text{III.} & \circ - 3_a - 3_e \frown 6_e - 6_a - \bullet \end{array}\right\} \text{Schema B.}$$

Diese Verbindungen sind in Fig. 120 ausgeführt.

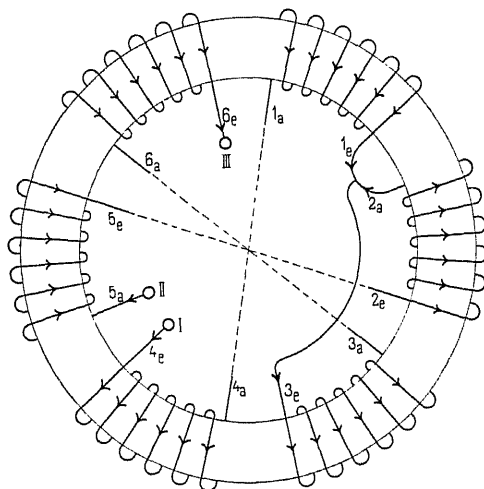



Fig. 121. Zweipolige dreiphasig aufgeschnittene Ringwicklung nach Schema D verbunden.

Wir sehen, daß wir von dem Schema A die mittlere Phase II umkehren müssen, um das Schema B zu erhalten, bei dem der räumliche Spulenwinkel gleich dem Phasenwinkel der Ströme ist.

Anstatt die mittlere Phase umzukehren, können wir auch die beiden äußeren umkehren, und erhalten dann das Schema

$$\left.\begin{array}{ll} \text{I.} & \circ - 4_a - 4_e \frown 1_e - 1_a - \bullet \\ \text{II.} & \circ - 2_a - 2_e \frown 5_e - 5_a - \bullet \\ \text{III.} & \circ - 6_a - 6_e \frown 3_e - 3_a - \bullet \end{array}\right\} \text{Schema C,}$$

das der Umkehrung des Schemas B entspricht.

Offenbar können wir für die Spulen einer Phase eine beliebige Reihenfolge wählen, wenn dabei nur der Wicklungssinn derselben nicht vertauscht wird. Wir können also z. B. das Schema B auch wie folgt schreiben

$$\left.\begin{array}{ll} \text{I.} & \circ - 4_e - 4_a \frown 1_a - 1_e - \bullet \\ \text{II.} & \circ - 5_a - 5_e \frown 2_e - 2_a - \bullet \\ \text{III.} & \circ - 6_e - 6_a \frown 3_a - 3_e - \bullet \end{array}\right\} \text{Schema D.}$$

Diese Verbindungen sind in Fig. 121 ausgeführt, da 1_e und 2_a benachbart sind, erhalten wir kürzere Querverbindungen.

Für die Dreieckschaltung sind die angegebenen Reihenfolgen der Spulen einer Phase ebenfalls gültig, es sind also nur die Verbindungen der Endklemmen entsprechend zu ändern. Im Schema B wäre z. B. 4_a mit 5_a, 2_a mit 3_a und 6_a mit 1_a zu verbinden.

Um eine Zweiphasenwicklung herzustellen, würden wir die Wicklung in $2am = 2 \cdot 2 = 4$ Teile teilen und nach dem Schema

$$\begin{array}{ll} \text{I.} & \circ - 1_a - 1_e \frown 3_e - 3_a - \bullet \text{I}' \\ \text{II.} & \circ - 2_a - 2_e \frown 4_e - 4_a - \bullet \text{II}' \end{array}$$

verbinden.

12. Die aufgeschnittenen Schleifenwicklungen.

Für die Schleifenwicklungen mit $a = p$, welche hier allein in Betracht kommen, haben wir (s. Seite 65) die Schaltungsformeln

$$y_1 = \frac{s \pm b}{2p} \pm 2$$

$$y_2 = \frac{s \pm b}{2p}$$

$$y = y_1 - y_2 = \pm 2.$$

Sollen alle Phasen der Mehrphasenwicklung eine gleiche Stabzahl erhalten, so muß

$$\frac{s}{2am} = \frac{s}{2pm} = \text{einer ganzen Zahl}$$

sein. Günstig ist es, wenn wir eine gerade Zahl erhalten, weil dann alle Enden der $2ap$ Teile auf dieselbe Seite der Wicklung fallen, was für die Ausführungen der Verbindungen bequem ist.

Eine aufgeschnittene vierpolige Schleifenwicklung stellt die Fig. 122 dar. Für dieselbe ist

$$s = 36, \qquad p = 2, \qquad a = 2, \qquad m = 3,$$

$$y_1 = \frac{36 \pm 0}{4} - 2 = 7$$

$$y_2 = \frac{36 \pm 0}{4} \qquad = 9.$$

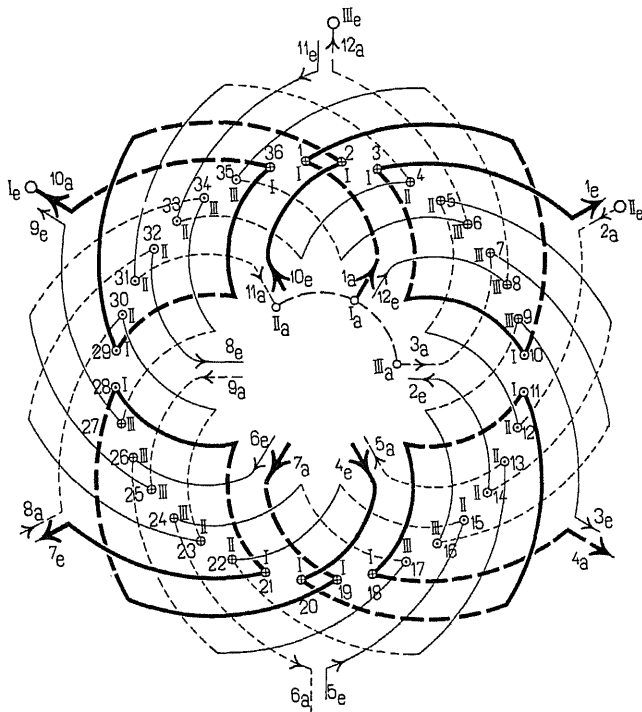



Fig. 122. Vierpolige dreiphasig aufgeschnittene Schleifenwicklung. $s = 36$.

●— $1_a - 1_e \frown 4_e - 4_a \frown 7_a - 7_e \frown 10_e - 10_a$ —○ I

II ○— $2_a - 2_e \frown 5_e - 5_a \frown 8_a - 8_e \frown 11_e - 11_a$ —●

●— $3_a - 3_e \frown 6_e - 6_a \frown 9_a - 9_e \frown 12_e - 12_a$ —○ III

Es ist also

Stab	1	mit	Stab	$1 + 9 = 10$
„	10	„	„	$10 - 7 = 3$
„	3	„	„	$3 + 9 = 12$
„	12	„	„	$12 - 7 = 5$ u. s. f.

zu verbinden.

Ferner wird

$$\frac{s}{2pm} = \frac{36}{12} = 3 .$$

Jeder der $2pm = 12$-Teile enthält also drei Stäbe. Gehen wir somit von einem Punkte der Wicklung aus und durchlaufen sie, so ist die Wicklung nach je drei Stäben aufzulösen. Die gewünschte Dreiphasenwicklung wird dann das unterhalb der Figur angegebene Schaltungsschema erhalten.

Da die Enden auf beiden Seiten der Wicklung liegen, sind in Fig. 122 die Verbindungen nicht eingezeichnet.

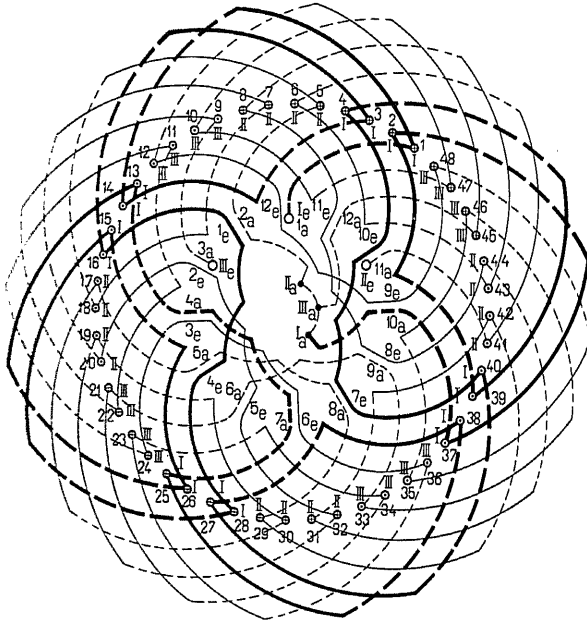



Fig. 123. Vierpolige dreiphasig aufgeschnittene Schleifenwicklung. $s = 48$.

$$\text{I} \ \circ\!- \ 1_a - 1_e \frown 4_e - 4_a \frown 7_a - 7_e \frown 10_e - 10_a \ -\!\bullet$$

$$\bullet\!- \ 2_a - 2_e \frown 5_e - 5_a \frown 8_a - 8_e \frown 11_e - 11_a \ -\!\circ \ \text{II}$$

$$\text{III} \ \circ\!- \ 3_a - 3_e \frown 6_e = 6_a \frown 9_a - 9_e \frown 12_e - 12_a \ -\!\bullet$$

Eine andere aufgeschnittene Schleifenwicklung für die Werte

$$s = 48, \qquad p = 2, \qquad a = 2, \qquad m = 3,$$

$$y_1 = 11, \qquad y_2 = 13, \qquad \frac{s}{2pm} = \frac{48}{12} = 4$$

ist in Fig. 123 wiedergegeben.

Da jeder Teil nun eine gerade Anzahl (4) Stäbe enthält, sind die Verbindungen einfacher auszuführen, als in Fig. 122. Das Verbindungsschema ist dasselbe wie bei dieser, nur sind Anschlußklemmen und neutraler Punkt vertauscht.

Wir können in jeder Phase auch eine Parallelschaltung vornehmen.

Schalten wir z. B. die Drähte in zwei Gruppen parallel, so ergibt sich das Verbindungsschema:

$$\text{I.}\quad \circ - \left\{\begin{matrix} 1_a - 1_e \frown 4_e - 4_a \\ 7_a - 7_e \frown 10_e - 10_a \end{matrix}\right\} - \bullet$$

$$\bullet - \left\{\begin{matrix} 2_a - 2_e \frown 5_e - 5_a \\ 8_a - 8_e \frown 11_e - 11_a \end{matrix}\right\} - \circ \quad \text{II.}$$

$$\text{III.}\quad \circ - \left\{\begin{matrix} 3_a - 3_e \frown 6_e - 6_a \\ 9_a - 9_e \frown 12_e - 11_a \end{matrix}\right\} - \bullet$$

Die im Verbindungsschema mit $\circ$ und $\bullet$ bezeichneten Enden der drei Phasen sind entweder in Stern oder in Dreieck zu verbinden. Es wäre auch möglich, so wie Fig. 124 zeigt, eine kombinierte Dreieck- und Sternschaltung auszuführen, wenn wir die Enden der sechs Gruppen so verbinden, wie in der Figur angegeben ist.

Bei dieser Anordnung kann man der Wicklung zwei verschiedene Spannungen entnehmen, eine niedere an den Verkettungspunkten und eine höhere an den Endpunkten 8_a, 10_a, 12_a.

Fig. 124. Kombinierte Dreieck- und Sternschaltung.

Die Verkettungspunkte sind hier in die Halbierungspunkte der einzelnen Phasen gelegt. Indem man als Verkettungspunkte irgend drei andere symmetrisch gelegene Punkte wählt, so daß immer eine gleiche Anzahl gleich gelegener Spulen im Dreieck geschaltet sind, kann man das Verhältnis der beiden Spannungen zueinander beliebig ändern.

13. Die aufgeschnittenen Wellenwicklungen.

Für die Wellenwicklungen haben wir die Schaltungsformel

$$y = y_1 + y_2 = \frac{s \pm 2a}{p}.$$

Aufgeschnittene einfache Reihenschaltung. Bei der einfachen Reihenschaltung ist $a = 1$, wir haben daher diese Wicklung nur in $2m$ Teile aufzulösen. Von den aufgelösten Gleichstromwicklungen ist daher die einfache Reihenschaltung die am meisten gebrauchte.

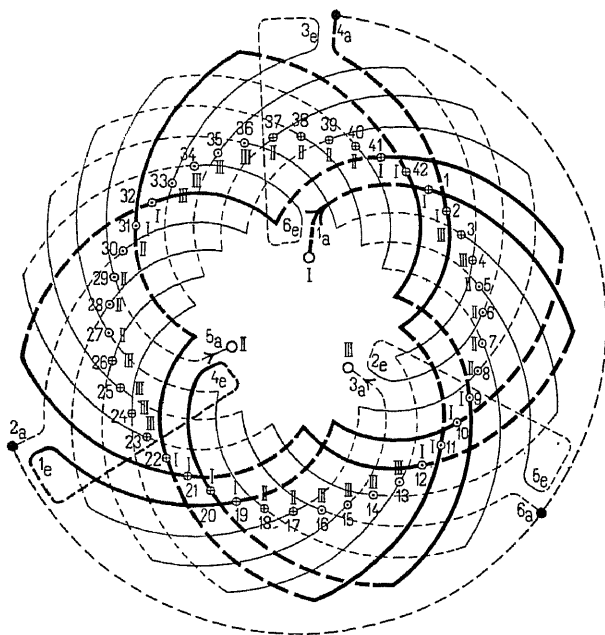



Fig. 125. Vierpolige dreiphasig aufgeschnittene Reihenschaltung. $s = 42$.

I ○— $1_a - 1_e \frown 4_e - 4_a$ —●

●— $2_a - 2_e \frown 5_e - 5_a$ —○ II

III ○— $3_a - 3_e \frown 6_e - 6_a$ —●

Die Fig. 125 zeigt eine dreiphasig aufgeschnittene Reihenschaltung. Es ist

$$s = 42, \qquad p = 2, \qquad a = 1, \qquad m = 3,$$

$$y_1 + y_2 = \frac{42 - 2}{2} = 20$$

$$y_1 = 9, \qquad y_2 = 11$$

$$\frac{s}{2m} = \frac{42}{6} = 7,$$

Es ist also

Stab	1	mit	Stab	$1 + 11 = 12$
„	12	„	„	$12 + 9 = 21$
„	21	„	„	$21 + 11 = 32$
„	32	„	„	$32 + 9 = 41$
„	41	„	„	$41 + 11 = 52 = 42 + 10$

also Stab 10 zu verbinden u. s. f.

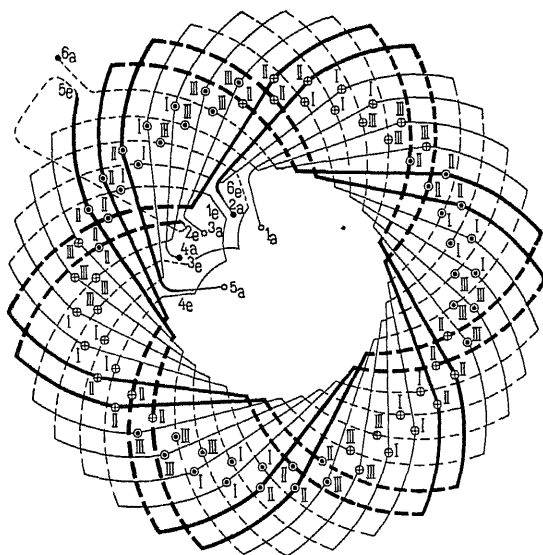



Fig. 126. Sechspolige dreiphasig unsymmetrisch aufgeschnittene Reihenschaltung. $s = 74$.

Gehen wir nun von irgend einem Punkte der Wicklung, z. B. dem Stabe 1 aus, so ist nach je 7 durchlaufenen Stäben die Wicklung aufzuschneiden. Wir erhalten $2ma = 6$ Gruppen, die nach dem unterhalb der Figur stehenden Schema zu verbinden sind.

In der Fig. 125 sind die Drähte am äußeren Umfange nach ihrer Zugehörigkeit zu den drei Phasen mit I, II, III numeriert und es ist eine bestimmte Stromrichtung angenommen.

Da bei der vorliegenden Wicklungsart die Stabzahl s als ganzzahlige, gerade Zahl der Wicklungsformel derart entsprechen muß, daß y_1 und y_2 ungerade werden, ist es nicht immer möglich, auch noch die Bedingung zu erfüllen, daß $\frac{s}{2m}$ eine ganze Zahl ist.

In diesem Falle kann man die Reihenwicklung unsymmetrisch aufschneiden, wie Fig. 126 veranschaulicht. Für dieselbe ist

$$s = 74, \qquad p = 3, \qquad a = 1, \qquad m = 3,$$

$$y_1 + y_1 = \frac{74 - 2}{3} = 24$$

$$y_1 = 11, \qquad y_2 = 13$$

$$\frac{s}{2m} = \frac{74}{6} = \frac{4 \cdot 12 + 2 \cdot 13.}{6}$$

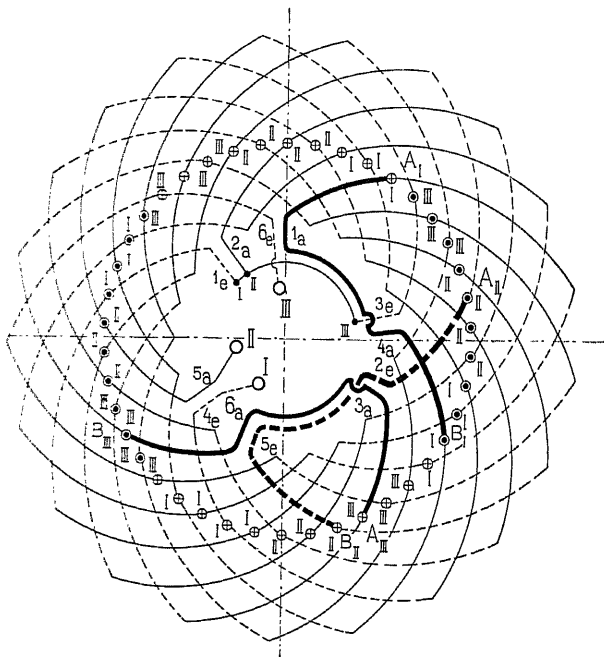



Fig. 127. Vierpolige dreiphasig unsymmetrisch aufgeschnittene Reihenschaltung. $s = 42$.

$$\text{I} \circ\!\!- \; 4_e \overset{(6)}{-} 4_a \frown 1_a \overset{(8)}{-} 1_e \; -\!\!\bullet$$

$$\text{II} \circ\!\!- \; 5_a \overset{(8)}{-} 5_e \frown 2_e \overset{(6)}{-} 2_a \; -\!\!\bullet$$

$$\text{III} \circ\!\!- \; 6_e \overset{(6)}{-} 6_a \frown 3_a \overset{(8)}{-} 3_e \; -\!\!\bullet$$

Wir haben nun die Wicklung in 6 Gruppen aufzulösen, von denen 4 je 12 Stäbe und 2 je 13 Stäbe enthalten. — Wenn wir in zwei Phasen je eine Gruppe mit 13 Stäben legen, so hat die dritte Phase einen Stab weniger als die übrigen; diese kleine Unsymmetrie ist jedoch bei Sternschaltung ohne Nachteil.

Die Fig. 126 bezieht sich auf einen Nutenanker mit zwei übereinander liegenden Stäben in einer Nute.

Bei Anwendung der später behandelten veränderten Gleichstromwicklungen ist es jedoch immer möglich, die Stabzahl s durch $2m$ teilbar zu machen.

Von dem unsymmetrischen Aufschneiden der Wicklung kann man auch Gebrauch machen, wenn $\frac{s}{2m}$ eine ganze, aber ungerade Zahl ist, indem man jeder Gruppe trotzdem eine gerade Anzahl

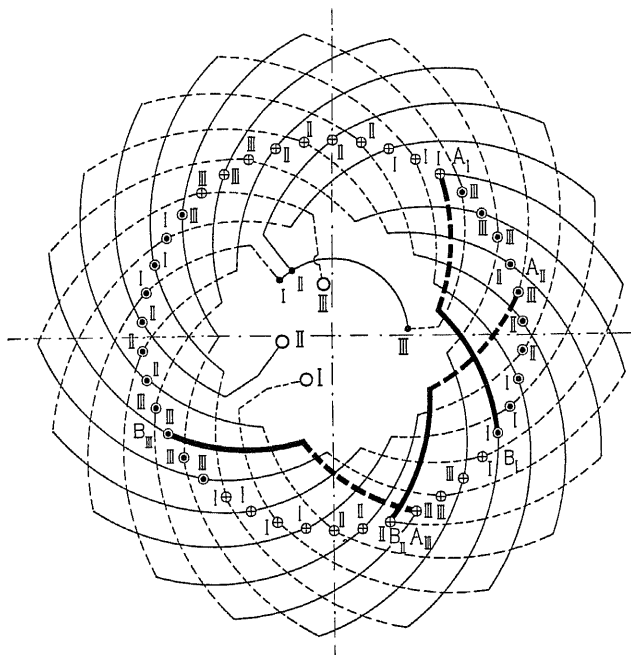



Fig. 128. Vierpolige dreiphasig aufgeschnittene Reihenschaltung ohne äußere Verbindungsstücke.

Stäbe zuteilt, damit alle Querverbindungen der Gruppen auf dieselbe Seite der Wicklung fallen.

Die in Fig. 125 dargestellte Wicklung kann z. B. auch so, wie in Fig. 127 gezeigt ist, aufgeschnitten werden. Wir erhalten in 3 Gruppen 8 und in 3 Gruppen 6 Stäbe; die Stabzahlen aller Phasen sind dagegen gleich, indem jeder Phase eine Gruppe von 8 und eine von 6 Stäben zugeteilt wird.

Die Verbindungen sind nach dem Schema D Seite 86 ausgeführt; die eingeklammerten Zahlen bezeichnen die Stabzahl der betreffenden Gruppe.

Die Unsymmetrie kommt dadurch zum Ausdruck, daß die Stabzahlen einer Phase pro Pol ungleich sind.

Die miteinander zu verbindenden Endstäbe der beiden Teile einer Phase A_I, B_I A_{II}, B_{II} und A_{III}, B_{III} sind um eine Polteilung voneinander entfernt. Man kann sie daher, statt durch die in Fig. 127 stark ausgezogenen Verbindungen $1_a - 4_a$, $2_e - 5_e$, $3_a - 6_a$, auch durch Verbindungsgabeln zusammenschließen, wie in Fig. 128 gezeigt ist. Die von den Stäben A_I, A_{III} und B_{II} ausgehenden Verbindungen sind dabei in anderer Richtung am Umfange abgebogen, wie in Fig. 127.

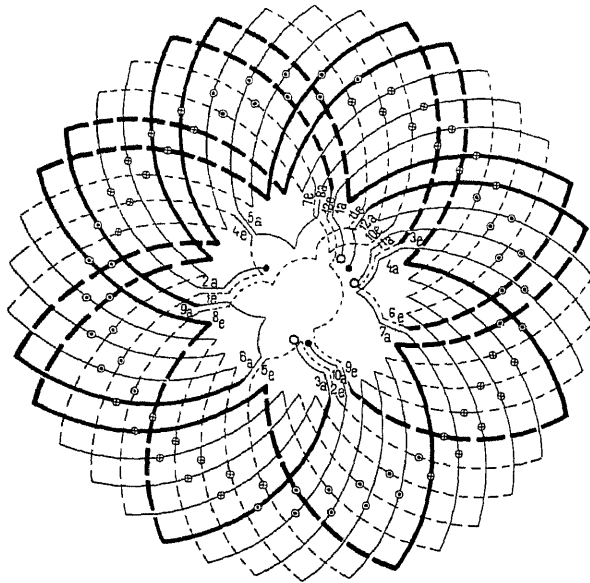



Fig. 129. Dreiphasig aufgeschnittene Reihenparallelschaltung. $s = 76$, $p = 4$, $a = 2$, $m = 3$.

$$\text{I} \circ\!- \; 1_a - 1_e \frown 4_e - 4_a \frown 7_a - 7_e \frown 10_e - 10_a \; -\!\bullet$$

$$\bullet\!- \; 2_a - 2_e \frown 5_e - 5_a \frown 8_a - 8_e \frown 11_e - 11_a \; -\!\circ \; \text{II}$$

$$\text{III} \circ\!- \; 3_a - 3_e \frown 6_e - 6_a \frown 9_a - 9_e \frown 12_e - 12_a \; -\!\bullet$$

Aufgeschnittene Reihenparallelschaltung. Wird $a > 1$ gewählt, so geht die Wellenwicklung über in die Reihenparallelschaltung des Verfassers. Eine solche läßt sich ebenfalls in eine mehrphasige Wicklung aufschneiden. Die Fig. 129 veranschaulicht eine solche dreiphasige achtpolige Wicklung für $a = 2$ und $s = 76$. Es ist

$$y_1 + y_2 = \frac{76 - 4}{4} = 18$$

$$y_1 = 9 \qquad y_2 = 9$$

$$\frac{s}{2\,am} = \frac{76}{12} = \frac{10 \cdot 6 + 2 \cdot 8}{12}.$$

Die Wicklung ist also in 12 Teile zu teilen, wovon 10 Teile je 6 Stäbe und 2 Teile je 8 Stäbe enthalten.

Nach den gegebenen Regeln ließen sich noch viele andere Gruppierungen entwerfen, für die praktischen Bedürfnisse werden jedoch die gegebenen Beispiele genügen.

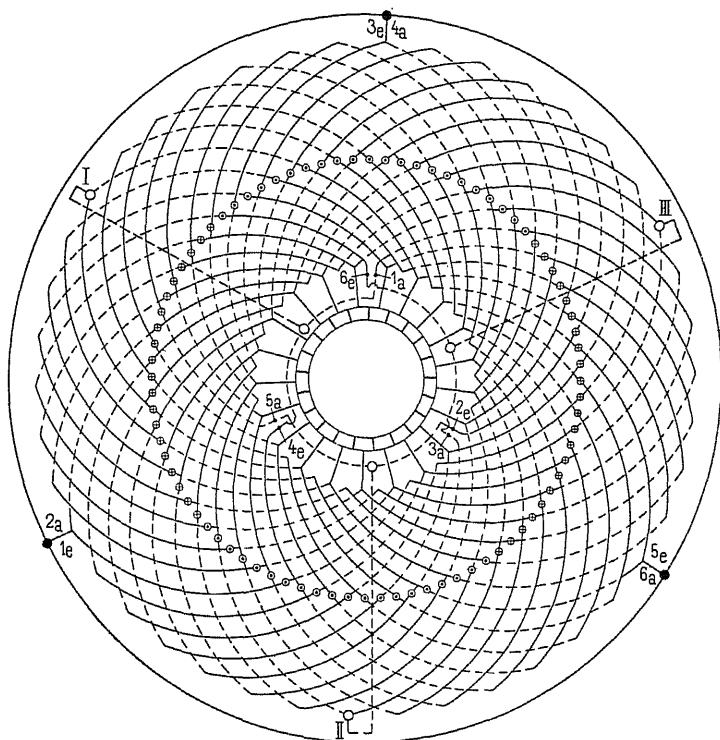



Fig. 130. Kombination einer dreiphasig aufgeschnittenen und einer unveränderten Gleichstromwicklung.

Die aufgeschnittenen Gleichstromwicklungen werden am häufigsten für die sekundären Wicklungen von asynchronen Motoren angewandt und zwar deswegen, weil hier meistens eine Stabwicklung ausgeführt werden kann, wofür die Gleichstromwicklung am geeignetsten ist, und weil es dann möglich ist, zwischen der primären und sekundären Nutenzahl des Motors ein Verhältnis zu erreichen, das nicht ganzzahlig ist.

14. Kombination aufgeschnittener und unveränderter Gleichstromwicklungen.

Die Kombination einer aufgeschnittenen und einer unveränderten Gleichstromwicklung ist in Fig. 130 dargestellt.[1]) Der Anker besitzt zwei getrennte Wicklungen. Die eine ist als reine Gleichstromwicklung ausgeführt und mit einem Kollektor versehen; die andere ist an

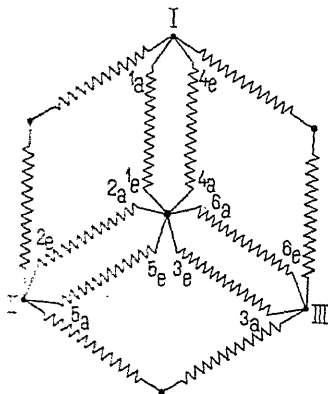



Fig. 131.

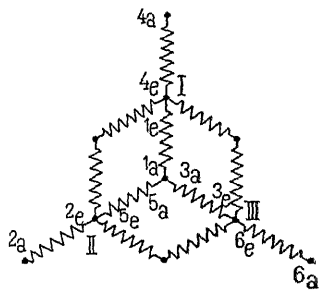



Fig. 132.

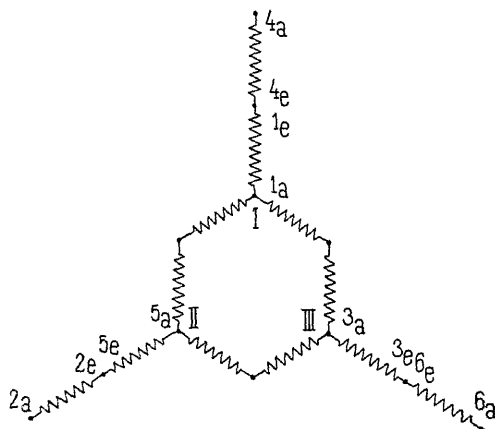



Fig. 133.

Fig. 131—133. Verbindungsschemata für die Kombination aufgeschnittener und unveränderter Gleichstromwicklungen.

6 Punkten aufgeschnitten, so daß die Teile $1_a - 1_e$, $2_a - 2_e$ .... $6_a - 6_e$ entstehen. Wie die schematische Darstellung der Schaltung

[1]) G. Osanna. Über Schaltungen mit aufgeschnittenen Gleichstromwicklungen. Zeitschr. f. Elektr. 1899, S. 349.

Fig. 131 zeigt, sind diese Teile so verbunden, daß eine Sternschaltung mit je zwei parallelen Stromzweigen pro Phase entsteht. Die freien Enden des Sterns sind mit den Punkten gleichen Potentials der unaufgeschnittenen Wicklung I, II und III verbunden. Aus dem Schema ist zu erkennen, daß die zwischen diesen Punkten induzierten EMKe in beiden Wicklungen gleich sind.

Der Nullpunkt dieser Schaltung kann gleichzeitig als Anschlußpunkt des Nullleiters eines Dreileitersystems dienen, da in ihm die Spannung zwischen den Gleichstrombürsten halbiert ist.

Aus einem derartigen Anker kann man, indem man die Punkte I, II, III und den Nullpunkt zu Schleifringen führt, Drehstrom von der verketteten Spannung und von der Phasenspannung und ferner Gleichstrom entnehmen, und außerdem kann man noch die Gleichstromspannung durch Anbringen eines Mittelleiters halbieren.

Die Drehstromspannung kann man erhöhen, indem man die einzelnen Zweige so verbindet, wie die Fig. 132 u. 133 zeigen. Bei der Schaltung Fig. 133 erhält man die höchste Spannung des Drehstromes; hier hat man jedoch keinen Nullpunkt für die Teilung der Gleichstromspannung mehr. (Siehe auch Abschnitt 40.)

Fünftes Kapitel.

Die abgeänderten Gleichstromwicklungen.

15. Die abgeänderte Reihenwicklung.

Die Stabzahl einer Gleichstromreihenschaltung muß der Gleichung

$$s = 2p \cdot y_k \mp 2$$

genügen. Diese Formel wird erhalten, indem man die Bedingung aufstellt, daß man, dem Wicklungsschema folgend, nach einer gewissen Anzahl von Umgängen wieder zum Ausgangspunkte zurückgelangt.

Sieht man von dieser Bedingung ab, so kann man zu der Stabzahl der Gleichstromwicklung, die mit dem resultierenden Wicklungsschritt

$$y_k = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{s \pm 2}{2p}$$

ausgeführt ist, eine gewisse Stabzahl hinzufügen oder von ihr wegnehmen, so daß eine andere gewünschte Stabzahl erhalten wird. Die Wicklung schließt sich dann nicht, und man muß, wenn man eine geschlossene Wicklung haben will, äußere Verbindungsstücke anbringen. Eine derartige Wicklung mit zugefügten oder weggenommenen Stäben soll als abgeänderte Gleichstromwicklung bezeichnet werden.

Will man eine unveränderte Reihenschaltung für Mehrphasenstrom verwenden und dabei für alle Phasen nur gleiche Stabzahlen z pro Phase zulassen, so erhält man als gesamte Stabzahl $m \cdot z$ und für den resultierenden Wicklungsschritt

$$y_k = \frac{mz \pm 2}{2p}.$$

Damit y_k eine ganze Zahl wird, dürfen m und z mit der Polpaarzahl p keinen gemeinschaftlichen Teiler haben. Die Wicklung ist also für Dreiphasenmaschinen, deren Polpaarzahl durch drei teilbar ist, und für Vierphasenarmaturen, bei denen p eine gerade Zahl ist, nicht anwendbar. Man kann jedoch die Bedingung, daß p und $m \cdot z$ teilerfremd sein müssen, umgehen, indem man eine abgeänderte Gleichstromwicklung ausführt. Man legt statt der Stabzahl $m \cdot z$ eine um u niederere oder höhere Stabzahl zu Grunde, für die eine Reihenschaltung möglich ist, und berechnet für diese den Wicklungsschritt. Zu dieser Gleichstromwicklung fügt man dann die u Stäbe hinzu oder nimmt sie weg. Die zugefügten Stäbe ändern an den Eigenschaften der Gleichstromwicklung nichts. Man kann die Wicklung daher, wie der Verfasser auch an anderer Stelle gezeigt hat,[1]) ohne weiteres mit einem Kollektor verbinden und sie für Umformer verwenden. Ferner ist es auch möglich, diesen Wicklungen gleichzeitig Drei- und Vierbezw. Zweiphasenstrom zu entnehmen, da man bei der Festsetzung der Stabzahl pro Stromzweig $m \cdot z$ unbeschränkt ist und daher eine Zahl wählen kann, die sowohl durch drei als auch durch vier teilbar ist.

Bei der Ausführung der Wicklung geht man so vor, daß man von den zuzufügenden Stäben je zwei einander zuordnet und sie um den Wicklungsschritt y_1 oder y_2 voneinander entfernt in die Nuten einlegt. Bei ungleichen Schritten y_1 und y_2 auf beiden Seiten der Armatur ist darauf zu achten, daß der Schritt mit den übrigen Schritten der gleichen Armaturseite übereinstimmt. Am einfachsten vermeidet man einen Irrtum, indem man, wie in Fig. 134 gezeigt ist, die Wicklungsschritte zwischen den überzähligen Stäben vor Aufzeichnung der Wicklung durch Eintragen der entsprechenden Verbindungen markiert und die übrigen Verbindungen in Übereinstimmung mit diesen annimmt. Abgesehen davon, wird die Wicklung der übrigen Stäbe ohne Rücksicht auf die überzähligen, indem man diese hierbei als nicht vorhanden ansieht, als gewöhnliche Gleichstromwicklung ausgeführt. Zum Schlusse schneidet man diese an passender Stelle auf und fügt die überzähligen Stäbe ein. Hat man die Stäbe an beliebiger Stelle eingesetzt, so erhält man bei jedem Stabpaar zwei freie Enden der Wicklung. Dieser Fall wird später bei der abgeänderten Reihenparallelschaltung erläutert werden. Bei der einfachen Reihenschaltung setzt man jedoch die überzähligen Stäbe am besten unter aufeinanderfolgende Pole immer um einen Wicklungsschritt entfernt ein und verbindet

---

[1]) ETZ 1902, S. 219.

alle miteinander. Dann wird zum Schließen der Wicklung nur ein äußeres Verbindungsstück notwendig.

Eine besonders einfache Wicklung erhält man, wenn man zu einer Gleichstromwellenwicklung mit $s' = 2p \cdot y_k \mp 2$ Stäben zwei Stäbe zufügt oder zwei Stäbe von ihr wegnimmt, so daß die Stabzahl der Wicklung $s = m \cdot z = s' \pm 2$ wird. Als resultierender Wicklungsschritt der zu Grunde gelegten Gleichstromwicklung ergibt sich dann

$$y_k = \frac{s' \pm 2}{2p} = \frac{(mz \mp 2) \pm 2}{2p} = \frac{m \cdot z}{2p} \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Hier muß also stets die Stabzahl pro Pol $\frac{m \cdot z}{2p}$ eine ganze Zahl sein.

Hat man zwei Stäbe pro Nut, so wird die Nutzahl ein Vielfaches der Polpaarzahl, so daß die Nuten unter allen Polpaaren gleiche Lage haben. Der resultierende Schritt ist gleich der doppelten Polteilung; die Feldverschiebung wird also Null.

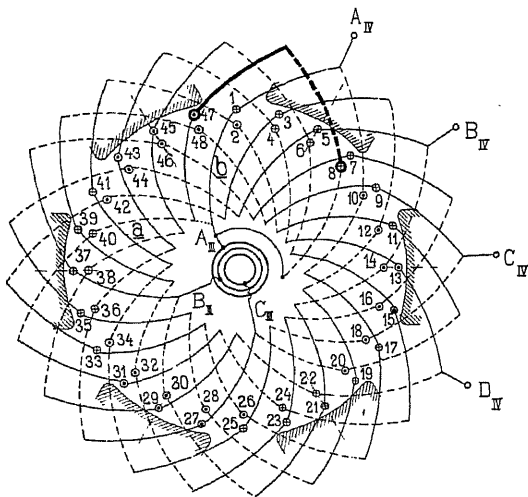



Fig. 134. Abgeänderte Gleichstromwicklung. $s = 48$, $p = 3$, $a = 1$, $m = 3$.

In Fig. 134 ist eine derartige Wicklung für

$$p = 3, \qquad a = 1, \qquad m = 3, \qquad z = 16, \qquad s = amz = 48$$

dargestellt. Wir legen eine Gleichstromreihenschaltung mit 46 Stäben zu grunde und erhalten

$$y_k = \frac{46 + 2}{6} = 8$$

$$y_1 = 9, \qquad y_2 = 7.$$

Zur Aufstellung des Wicklungsschemas zeichnen wir eine Armatur mit 48 Stäben auf und wählen zwei um den Wicklungsschritt $y_1 = 9$ entfernte Stäbe aus, die wir als zugefügte Stäbe betrachten wollen. In Fig. 134 sind diese Stäbe durch besonders starke Kreise bezeichnet, und auch im folgenden sollen die überzähligen Stäbe stets ebenso bezeichnet werden. Da y_1 und y_2 ungleich sind, müssen wir darauf achten, daß der Schritt zwischen den zugefügten Stäben mit den übrigen Schritten übereinstimmt.

Wir verbinden die überzähligen Stäbe daher durch eine Gabel; diese ist im Schema durch besonders starke Striche hervorgehoben. Die Verbindungen auf der Seite, auf der diese Gabel liegt, werden dann alle einander gleich und können sofort aufgezeichnet werden. Auf der andern Seite der Wicklung werden die zugefügten Stäbe ohne Verbindungen gelassen und sämtliche andern Stäbe der Reihe nach miteinander verbunden. Die Verbindungen, die einen der zugefügten Stäbe einschließen, werden dann auf dieser Seite länger als die übrigen. Die Wicklung schließt sich mit Auslassung der zugefügten Stäbe.

Hierauf wird die erste der längeren Verbindungen, die Gabel *ab* an der punktierten Stelle aufgeschnitten und *a* mit dem einen und *b* mit dem andern der zugefügten Stäbe verbunden. *a* bildet dann wieder einen Teil einer Gabel, während die von *b* ausgehende Verbindung außerhalb der Wicklung liegt. An der Stelle, wo die beiden Stäbe eingefügt sind, entsteht eine Schleife. Die abgeänderte Reihenschaltung mit zwei eingefügten Stäben kann also auch als Reihenwicklung mit eingesetzter Schleife betrachtet werden.

Will man die Aufzeichnung des Wicklungsschemas vermeiden, so kann man auch auf sehr einfache Weise die abgeänderte Reihenschaltung durch eine Wicklungstabelle darstellen.

Man numeriert sämtliche Stäbe mit Einschluß der zugefügten fortlaufend und stellt eine Tabelle der auszuführenden Verbindungen auf, wie dies für die Wicklung Fig. 134 im folgenden gezeigt ist.

Tabelle einer abgeänderten Reihenwicklung.

$s = 48, \quad p = 3, \quad a = 1, \quad m = 3.$

A_{III}	1	10	17	26	33	42
	3	12	19	28	35	44
	5	14	21	30 B_{III}	37	46
	7	16	23	32	39	48
	9	18	25	34	41	2
	11	20 C_{III}	27	36	43	4
	13	22	29	38	45	6
	15	24	31	40	47	8 A_{III}

Die Zahlen werden dabei in $2p$ vertikalen Reihen angeordnet. Die Differenz zweier nebeneinander stehender Glieder ist jeweils gleich dem Wicklungsschritt y_1 bezw. y_2 und die Differenz zwischen zwei untereinander stehenden Zahlen gleich 2. Wir brauchen also nur bei der ersten Zeile der Tabelle auf den Wicklungsschritt zu achten, die folgenden Zeilen ergeben sich dann einfach, indem man zu den vorhergehenden zwei hinzufügt oder abzieht. Die überzähligen Stäbe werden ohne weiteres eingefügt.

Die Tabelle der abgeänderten Reihenschaltung mit zwei eingefügten Stäben wird also analog der Tabelle der unveränderten; nur beim Übergang von einer Zeile zur nächstfolgenden wird der Wicklungsschritt um zwei größer; hier liegen die oben bereits erwähnten längeren Verbindungen. Der erste und der letzte Stab der Tabelle sind diejenigen, welche durch eine außerhalb der Wicklung gelegene Verbindung zu vereinigen sind.

Diese Tabelle kann man auch bei der Aufzeichnung des Wicklungsschemas benutzen, indem man die Stäbe am Umfange durchlaufend numeriert, wie dies in Fig. 134 geschehen ist, und die in der Tabelle angegebenen Verbindungen einzeichnet. Auf die zugefügten Stäbe braucht man dabei keine Rücksicht zu nehmen.

Da die Stabzahl der gezeichneten Wicklung $s = 48$, sowohl durch drei als auch durch vier teilbar ist, kann man dieser sowohl Dreiphasen- als auch Vierphasenstrom entnehmen. Für Dreiphasenstrom erhält man $z = \frac{48}{3} = 16$ und für Vierphasenstrom $z = \frac{48}{4} = 12$. In Fig. 134 sind der Übersichtlichkeit halber die Anschlußpunkte A_{III}, B_{III}, C_{III} für Dreiphasenstrom nach innen und die Anschlüsse A_{IV}, B_{IV}, C_{IV}, D_{IV} nach außen aufgezeichnet. Die Lage der Anschlußpunkte findet man am einfachsten aus der Wicklungstabelle, indem man von einem Punkt bis zum folgenden um z Nummern weiterzählt. Die Anschlußpunkte A_{III}, B_{III} und C_{III} für Dreiphasenstrom sind in die Tabelle eingeschrieben.

Aufgeschnittene abgeänderte Reihenschaltung. Wie bei den unveränderten Gleichstromwicklungen liegen auch bei der abgeänderten, wenn der Wicklung Dreiphasenstrom entnommen werden soll, die Stäbe jeder Phase nicht beieinander. Um dies zu vermeiden, kann man die Wicklung gerade so, wie für die gewöhnliche Gleichstromwicklung gezeigt wurde, aufschneiden. In Fig. 135 ist das Schema einer solchen Wicklung für

$$p=3, \quad a=1, \quad m=3, \quad z=20, \quad s=a\cdot m\cdot z=60$$

aufgezeichnet. Der Wicklungsschritt y beträgt:

$$y_k=\frac{maz}{2p}=\frac{60}{6}=10$$

$$y_1=11, \qquad y_2=9.$$

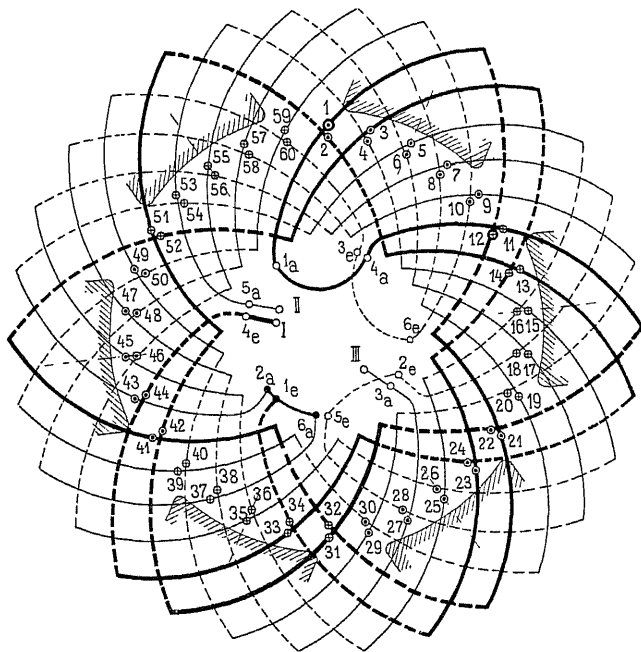



Fig. 135. Aufgeschnittene abgeänderte Reihenschaltung.
$p=3,\ a=1,\ m=3,\ z=20,\ s=60.$

Tabelle der Verbindungen:

I. ○— $4_e\, 4_a - 1_a\, 1_e$ —●
II. ○— $5_a\, 5_e - 2_e\, 2_a$ —●
III. ○— $3_a\, 3_e - 6_e\, 6_a$ —●

Hiermit ergibt sich folgende Wicklungstabelle:

[1_a — 1	12	21	32	41	52
3	14	23	34 — 1_e]	[2_a — 43	54
5	16	25	36	45	56
7	18 — 2_e]	[3_a — 27	38	47	58
9	20	29	40	49	60 — 3_e]
[4_a — 11	22	31	42	51	2
13	24	33	44 — 4_e]	[5_a — 53	4
15	26	35	46	55	6
17	28 — 5_e]	[6_a — 37	48	57	8
19	30	39	50	59	10 — 6_e]

Mit Hilfe dieser Tabelle kann man die Stellen, an denen die Wicklung aufgeschnitten wird, sehr leicht bestimmen, indem man jeweils von einem Schnittpunkt zum folgenden (in horizontaler Richtung 1—12—21—32 u. s. f. fortschreitend) $\frac{s}{2ma} = 10$ Stäbe weiter zählt.

Wir bezeichnen die Anfänge und Enden der einzelnen Teile mit 1_a, 1_e, 2_a, 2_e u. s. w. und verbinden sie, wie oben bei den aufgeschnittenen Gleichstromwicklungen ausführlich behandelt ist. Die Schaltung der einzelnen Phasen ist so gewählt, daß die Verbindungsstücke möglichst kurz werden.

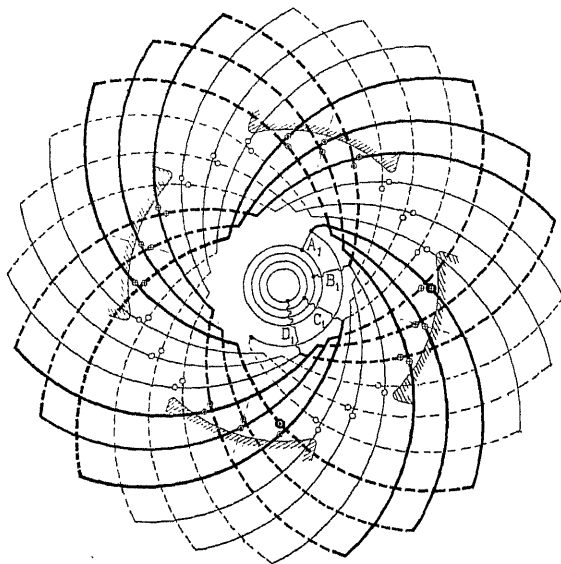



Fig. 136. Abgeänderte Reihenschaltung mit ganzer Stabzahl (3) pro Pol und Phase. $s = 48$, $p = 2$, $a = 1$, $m = 4$.

Das sonst bei der abgeänderten Reihenschaltung notwendige besondere Verbindungsstück fällt hier weg, da einer der Schnitte an die betreffende Stelle verlegt ist.

Bei den unveränderten und ebenso bei den gewöhnlichen aufgeschnittenen Gleichstromwicklungen darf, wie oben erklärt ist, die Stabzahl z pro Phase mit p keinen gemeinschaftlichen Teiler haben. Es ist daher nicht möglich, diese Wicklungen mit ganzen Stabzahlen x pro Pol und Phase auszuführen, da ja dann die Stabzahl pro Phase $z = 2px$ würde. Für die abgeänderten Gleichstromwicklungen, bei denen man in der Wahl der Stabzahlen unbeschränkt ist, besteht dieses Hindernis jedoch nicht. In Fig. 136 ist z. B. eine vierpolige

Vierphasenwicklung mit $z = 12$, also 3 Stäben pro Pol und Phase, dargestellt. Die Stabzahl beträgt $m \cdot z = 48$. Als resultierender Wicklungsschritt ergibt sich:

$$y_k = \frac{m \cdot z}{2p} = \frac{48}{4} = 12$$

$$y_1 = 13, \qquad y_2 = 11.$$

Löst man eine derartige Wicklung zu einer Zweiphasenwicklung auf, so erhält man eine Wicklung, die vollständig mit der in Fig. 100 S. 60 dargestellten umlaufenden Zweiphasenwicklung mit zwei Stäben pro Nut übereinstimmt.

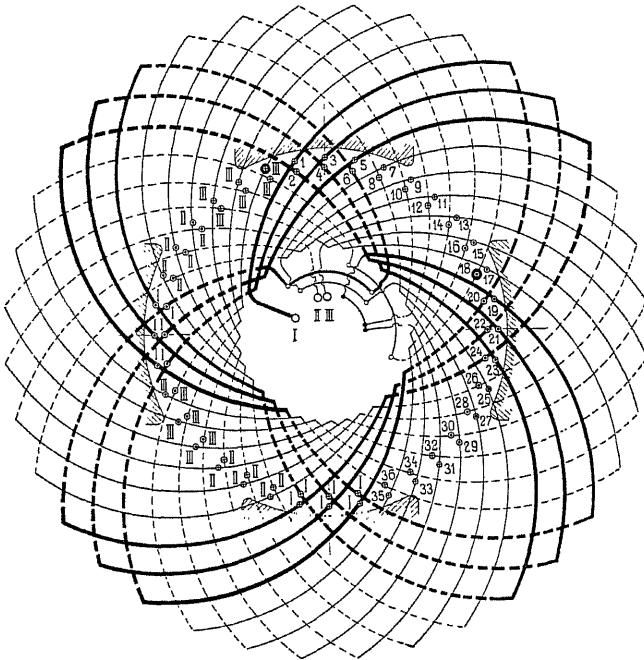



Fig. 137. Aufgeschnittene abgeänderte Reihenschaltung mit ganzer Stabzahl (6) pro Pol und Phase. $s = 72$, $p = 2$, $a = 1$, $m = 3$.

Ebenso ist eine solche aufgeschnittene Dreiphasenwicklung mit gerader Stabzahl r pro Pol und Phase identisch mit einer umlaufenden Dreiphasenwicklung mit zwei Stäben pro Nut, wie sie in Fig. 106 dargestellt ist. In Fig. 137 ist das Schema einer derartigen Wicklung mit 6 Stäben pro Pol und Phase aufgezeichnet. Es ist hier

$$m = 3, \quad p = 2, \quad a = 1, \quad z = 2p \cdot 6 = 24, \quad s = 72.$$

$$y_k = \frac{s}{2p} = \frac{72}{4} = 18$$

$$y_1 = 19, \qquad y_2 = 17.$$

Die Stäbe sind auf der einen Hälfte der Wicklung, wie bei den im vorhergehenden behandelten Wicklungen fortlaufend numeriert und auf der andern Hälfte, wie bei den umlaufenden Wicklungen mit Phasenzahlen versehen. Aus dem Vergleich mit Fig. 106 kann man erkennen, daß die vorliegende Wicklung vollständig einer umlaufenden Wicklung mit zwei Stäben pro Nut entspricht.

Tabelle für eine abgeänderte Reihenschaltung mit:

$m = 3, \quad p = 2, \quad s = 72.$

1_a — 1	20	37	56
3	22	39	58
5	24	41	60 — 1_e
2_a — 7	26	43	62
9	28	45	64
11	30	47	66 — 2_e
3_a — 13	32	49	68
15	34	51	70
17	36	53	72 — 3_e
4_a — 19	38	55	2
21	40	57	4
23	42	59	6 — 4_e
5_a — 25	44	61	8
27	46	63	10
29	48	65	12 — 5_e
6_a — 31	50	67	14
33	52	69	16
35	54	71	18 — 6_e

Die Stellen, an denen die Wicklung aufzuschneiden ist, findet man, wie oben erläutert, aus der beigefügten Wicklungstabelle. Jeder Teil setzt sich aus

$$\frac{s}{2m} = \frac{2pr \cdot m}{2m} = pr$$

Stäben zusammen. Hierfür können wir, da r eine gerade Zahl ist, auch schreiben $\frac{s}{2m} = 2pu$, wo $u = \frac{r}{2}$ eine ganze Zahl ist. (Für 2 Stäbe pro Nut wird u gleich der Nutenzahl pro Pol und Phase q). Da bei einem Umgang der Wicklung $2p$ Stäbe berührt werden, kommt man daher stets nach u bezw. q vollen Umgängen zu einem

Schnittpunkt und alle Schnittpunkte liegen um je u Knotenpunktsteilungen voneinander entfernt.

Die Ausführung der vielen Verbindungen an der gleichen Stelle kann in manchen Fällen unbequem sein. Man wird dann zweckmäßiger eine Wicklung, wie sie Fig. 135 zeigt, ausführen, bei der die Stabzahl pro Pol und Phase keine ganze Zahl ist, da hier die Verbindungen auf den ganzen Umfang verteilt sind.

16. Die abgeänderte Reihenparallelwicklung.

Auch bei der Reihenparallelwicklung ist es möglich, durch Hinzufügen oder Weglassen von Stäben irgend eine gewünschte Stabzahl maz zu erreichen. Die Bedingung einer ganzen Stabzahl pro Pol führt hier entsprechend der Wicklungsformel

$$y_k = \frac{s' \pm 2a}{2p}$$

dazu, daß man der zu Grunde liegenden Gleichstromwicklung $\pm 2a$ oder $\pm(2p - 2a)$ Stäbe zufügen muß. In ersterem Falle erhält man auch hier den Wicklungsschritt

$$y_k = \frac{maz}{2p},$$

im anderen Fall wird der Wicklungsschritt etwas kürzer oder länger als die Polteilung

$$y_k = \frac{[maz \mp (2p - 2a)] \pm 2a}{2p} = \frac{maz}{2p} \mp 1.$$

Das Hinzufügen von $\pm(2p - 2a)$ Stäben kommt dann in Betracht, wenn $2p - 2a < 2a$ oder $2p < 4a$ ist.

Ein Beispiel einer derartigen Wicklung gibt Fig. 138. Hier ist

$$m = 3, \quad p = 3, \quad a = 2, \quad z = 12, \quad s = maz = 72$$

also $2p < 4a$. Wir legen eine Gleichstromwicklung mit der um $2p - 2a = 2$ geringeren Stabzahl $s' = 70$ zu grunde und erhalten

$$y_k = \frac{s' - 2a}{2p} = \frac{70 - 4}{6} = 11$$

$$y_1 = 11 \qquad y_2 = 11.$$

Die beiden zugefügten Stäbe sind wieder durch besonders starke Kreise bezeichnet.

Wenn die zu Grunde liegende unveränderte Reihenparallelschaltung einfach geschlossen ist, kann man, wie Fig. 139 zeigt,

die zuzufügenden Stäbe alle um einen Wicklungsschritt entfernt unter aufeinanderfolgenden Polen anordnen und unter sich verbinden. Man erhält dann nur eine äußere Verbindung. Man kann jedoch auch je zwei Stäbe an verschiedenen Punkten des Umfanges einsetzen und erhält dann entsprechend mehr äußere Verbindungsstücke. Hierdurch erreicht man, wie später gezeigt werden soll, eine größere Gleichheit der in den einzelnen Stromzweigen jeder Phase induzierten EMKe.

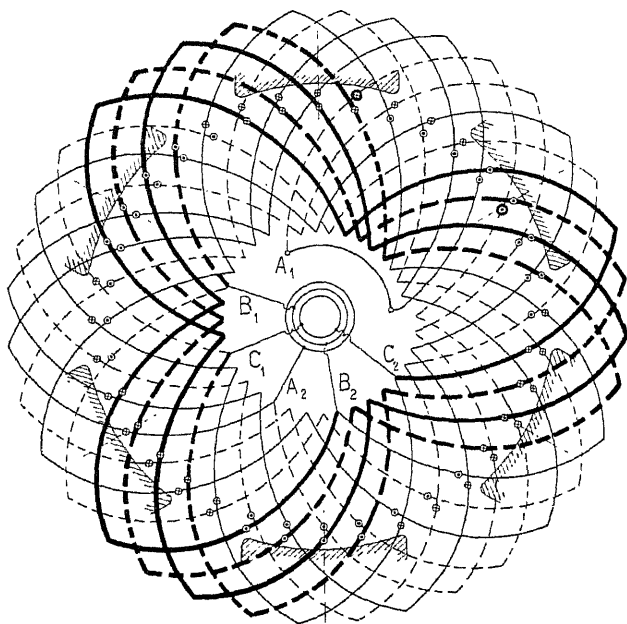



Fig. 138. Abgeänderte Reihenparallelschaltung mit zwei zugefügten Stäben. $s = 72$, $p = 3$, $a = 2$, $m = 3$.

Bei einer mehrfach geschlossenen Wicklung sind die überzähligen Stäbe gleichmäßig auf die Einzelwicklungen zu verteilen, oder man kann diese Wicklung auch zu einer einfach geschlossenen machen, indem man von zwei miteinander verbundenen überzähligen Stäben einen mit einer der Einzelwicklungen und den andern mit einer andern Einzelwicklung vereinigt.

Bei der Aufstellung des Wicklungsschemas geht man wie bei der einfachen Reihenschaltung vor. Man zeichnet zuerst die Verbindungen der überzähligen Stäbe ein und verbindet dann die übrigen Stäbe, ohne die zugefügten weiter zu berücksichtigen, zu der zu Grunde liegenden Gleichstromwicklung. Hierauf schneidet

man diese auf und fügt die überzähligen Stäbe ein. In Fig. 139 ist die zuerst eingezeichnete Verbindung dieser Stäbe durch besonders starke Striche hervorgehoben.

Die **Anschlußpunkte der einzelnen Phasen** müssen, wie auf S. 67 bereits erläutert wurde, Punkte gleichen Potentials sein. Falls die Wicklung einfach geschlossen ist, kann man die Punkte finden, indem man, von irgend einem Stabe ausgehend, jeweils nach z Stäben einen Anschluß legt und eine andere Phase beginnt. Bei mehrfach geschlossenen Wicklungen wählt man irgend einen Stab einer Einzelwicklung als Anschlußpunkt der ersten Phase und geht von

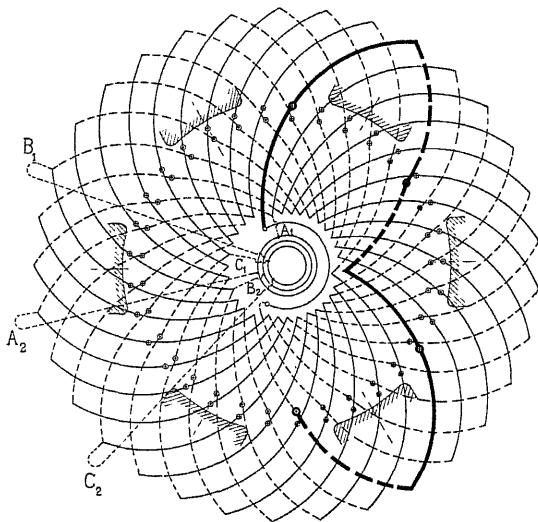



Fig. 139. Einfach geschlossene abgeänderte Reihenparallelschaltung mit vier zugefügten Stäben. $s = 66$, $p = 3$, $a = 2$, $m = 3$.

diesem um einen oder mehrere Potentialschritte, d. h. um eine oder mehrere Polpaarteilungen weiter. Die dort gelegenen Stäbe der anderen Einzelwicklungen sind als Anschlußpunkte der ersten Phase zu nehmen. Die Anschlußpunkte der übrigen Phasen findet man, indem man von den erst erhaltenen Abzweigstellen aus jeweils z Stäbe in der Wicklung weiter zählt.

Wählt man a gleich der halben Stabzahl pro Nut $\frac{s_n}{2}$, so kommen die parallelen Zweige jeder Phase in die gleichen Nuten zu liegen und die in ihnen induzierten EMKe werden gleich. Man kann jedoch auch eine um g größere Zahl paralleler Zweige $g \cdot \frac{s_n}{2}$ aus-

führen. Bei der unveränderten Gleichstromwicklung sind in diesem Falle die parallelen Zweige im Felde gegeneinander verschoben. Bei den abgeänderten Wicklungen vertauschen jedoch an den Stellen, wo die überzähligen Stäbe eingesetzt sind, die einzelnen Stromzweige ihre Lage im Felde, und man kann daher, indem man diese Stäbe an passenden Stellen einfügt, die Unsymmetrie zum Teil beseitigen. Man teilt den Armaturumfang in g Teile und fügt am Anfang jedes Teiles je s_n Stäbe unter den beiden ersten aufeinanderfolgenden

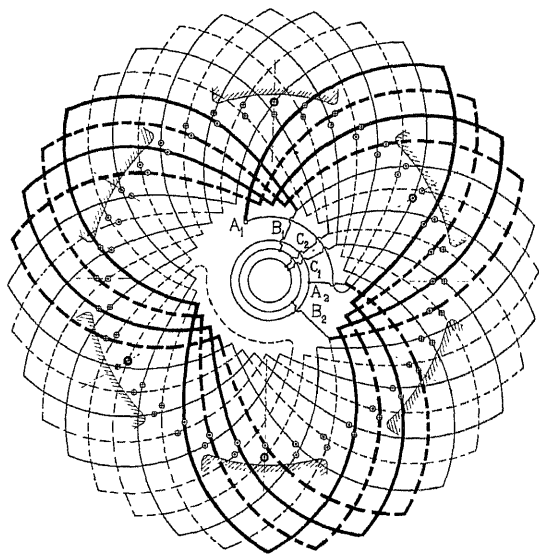



Fig. 140. Mehrfach geschlossene, abgeänderte Reihenparallelschaltung mit vier zugefügten Stäben. $s = 72$, $p = 3$, $a = 2$, $m = 3$.

Polen, die zu diesem Teile gehören, ein, und zwar sind $\frac{s_n}{2}$ Stäbe in den oberen Teil der ersten Nut jedes Teiles und $\frac{s_n}{2}$ Stäbe in den unteren Teil der um eine Polteilung entfernten Nut dieses Kreises einzusetzen. Die Stromkreise vertauschen dann am Umfange $g$mal ihre gegenseitige Lage und es wird eine annähernde Gleichheit der induzierten EMKe erreicht.

In Fig. 140 ist eine derartige Verteilung der zugefügten Stäbe dargestellt. Die Wicklung ist entworfen mit

$$m = 3, \quad p = 3, \quad a = 2, \quad z = 12, \quad s = 72, \quad s_n = 2.$$

Der Wicklungsschritt beträgt

$$y_k = \frac{zam}{2p} = \frac{72}{6} = 12$$

$$y_1 = 13, \qquad y_2 = 11.$$

Die zu Grunde liegende Gleichstromwicklung hat $maz - 2a = 72 - 4 = 68$ Stäbe. Da $\frac{68}{2} = 34$ und $y_k = 12$ den gemeinschaftlichen Teiler zwei haben, ist die Wicklung zweifach geschlossen. g ist hier gleich zwei; wir müssen die Armatur daher in zwei gleiche Teile teilen, die zugefügten Stäbe folglich an diametralen Punkten einsetzen. Die eine der Einzelwicklungen ist voll ausgezogen, die andere gestrichelt. Wie man sieht, vertauschen sie an den Stellen, wo die überzähligen Stäbe eingefügt sind, ihre Lage im Feld, denn an diesen Stellen folgen zwei punktierte Verbindungen, die zu der gleichen Wicklung gehören, aufeinander.

Sechstes Kapitel.

Wechselstromwicklungen für große Stromstärken.

17. Besondere Wicklungen für große Stromstärken.

Wechselstromwicklungen für große Stromstärken kommen bei Niederspannungsmaschinen und Maschinen, deren Leistung im Verhältnis zur Spannung groß ist, in Frage. Ihre Ausführung bietet bei sehr großen Stromstärken einige Schwierigkeiten, die elektrischer und mechanischer Natur sind.

Zunächst darf der Stabquerschnitt mit Rücksicht auf die Vergrößerung des Widerstandes durch die Oberflächenwirkung (Skineffekt s. S. 368 Bd. I) und mit Rücksicht auf die Wirbelströme, die durch das Nutenfeld in massiven Stäben induziert werden, gewisse Grenzen nicht überschreiten. Man geht selten über 300 bis 400 mm² hinaus.

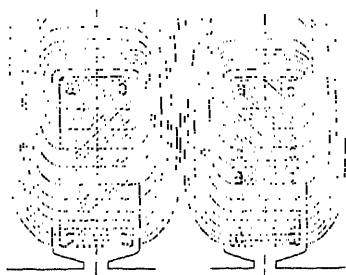



Fig. 141 a. Fig. 141 b.

Wie aus den Fig. 141 a und b ersichtlich, induziert das Nutenquerfeld, das vom Wechselstrome erzeugt wird, in dem Streifen *a-b* eines Stabes, der am tiefsten in der Nut liegt und von allen Kraftlinien geschnitten wird, die größte und in dem äußeren Streifen *c-d* die kleinste EMK. Es entstehen daher im Leiter Wirbelströme und der Arbeitsstrom wird nach außen (nach *c-d*) gedrängt, so daß er sich ungleich über den Querschnitt verteilt, wodurch der effektive Widerstand des Leiters erhöht wird.

Es ist daher zweckmäßig, große Leiterquerschnitte quer zur Nut, wie Fig. 141 b zeigt, zu trennen und die Wicklung mit zwei oder mehr parallelen Drähten pro Loch auszuführen.

Ein Verlöten der Stäbe einer Nut an beiden Enden würde den Nutzen der Trennung vernichten, da für die Wirbelströme

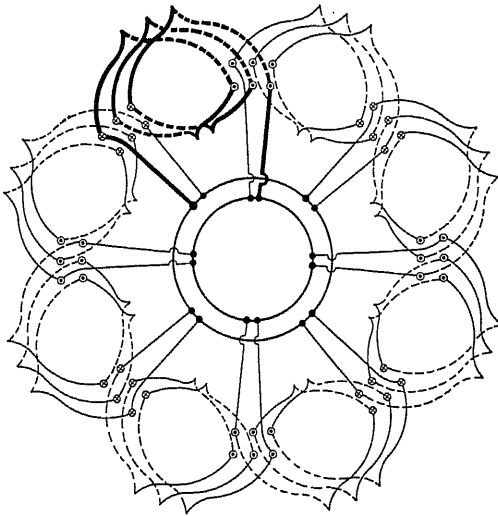



Fig. 142. Dreilochspulenwicklung mit acht parallelen Zweigen.

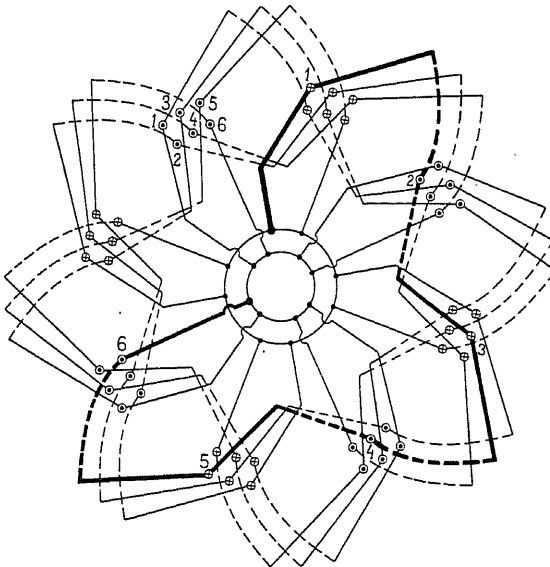



Fig. 143. Umlaufende Dreilochwicklung mit acht parallelen Zweigen.

der obere und untere Stab einen in sich geschlossenen Stromkreis bilden. Ein Spalten des Drahtes längs der Nut ist wenig wirksam.

Mit großer Sorgfalt ist ferner darauf zu achten, daß die parallel geschalteten Windungen gleich große EMKe ergeben, die miteinander in Phase sind, so daß keine inneren Ströme entstehen. Es muß also jede Gruppe von Spulen mit allen übrigen mit ihr parallel geschalteten Gruppen vollkommen übereinstimmen, sowohl hinsichtlich der Lage der Stäbe im Felde und in den Nuten, als auch der Zahl der Stäbe oder Windungen.

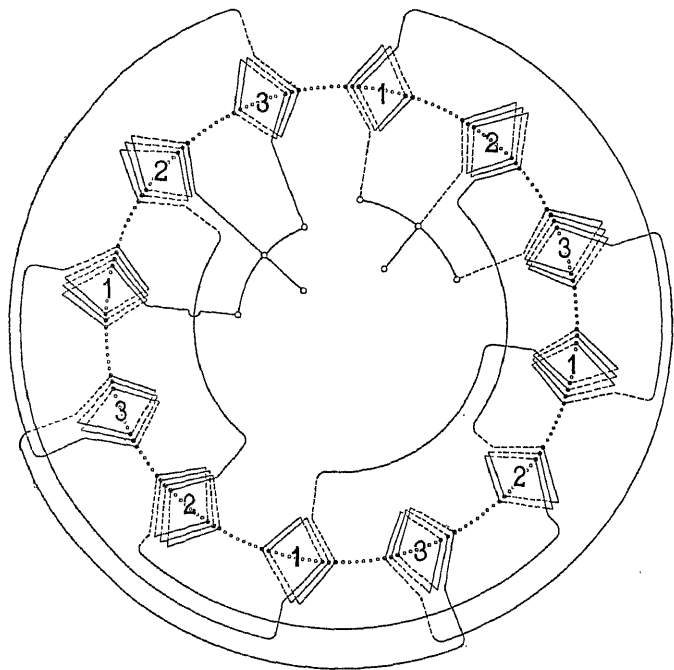



Fig. 144. Spulenwicklung für große Stromstärken (drei parallele Zweige).

In Fig. 142 ist eine einphasige Spulenwicklung dargestellt, die auch für jede Phase einer Mehrphasenwicklung Gültigkeit hat. 8 Spulengruppen von je drei Windungen sind parallel geschaltet und jeder Gruppe gehören drei Stäbe, die oben, und drei Stäbe, die unten in der Nut liegen, an.

Liegt bei dieser Wicklung das Magnetrad exzentrisch zum Anker, so wird sich die Belastung nicht gleichmäßig auf alle Spulen verteilen, obwohl die Ankerrückwirkung, die bei den stark belasteten Spulen am größten ist, auf eine gleiche Verteilung der Belastung hinwirkt.

Eine gegen magnetische Unsymmetrien weniger empfindliche Wicklung entsteht, wenn wir die Stäbe zu einer umlaufenden Wick-

lung verbinden, wie Fig. 143 zeigt. Hierbei ist darauf zu achten, daß jeder Wellenzug eine gleiche Anzahl im Felde gleich gelegener

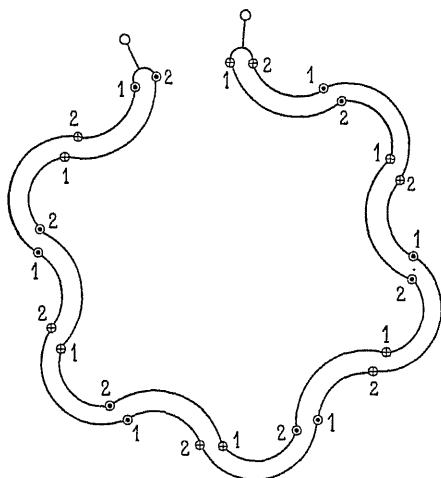



Fig. 145. Umlaufende Wicklung mit zwei parallelen Zweigen.

Stäbe enthält. In der Figur besitzt jeder Wellenzug von den 6 verschieden im Felde liegenden Stäben je einen.

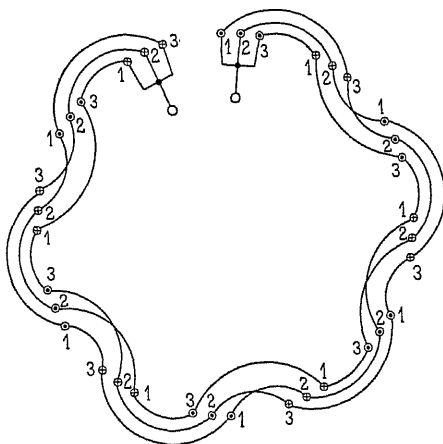



Fig. 146. Umlaufende Wicklung mit drei parallelen Zweigen.

Ein 24 poliges dreiphasiges Schema mit 72 Stäben pro Phase, welche in 3 Gruppen zu 24 parallel geschaltet sind, zeigt Fig. 144. Die Stirnverbindungen der Stäbe sind nur für eine Phase gezeichnet. Wir könnten die aufeinanderfolgenden Spulen von je 8 Polen zu

einer Gruppe hintereinander verbinden und würden so die kleinste Zahl von Querverbindungen erhalten. In Fig. 144 sind jedoch

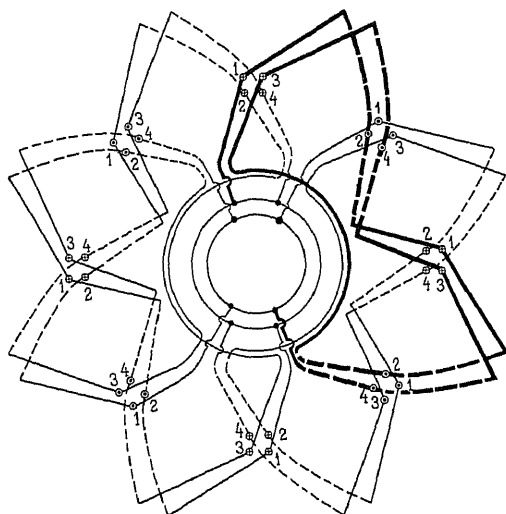



Fig. 147. Gemischte Wellen- und Schleifenwicklung mit vier Stäben pro Pol und vier parallelen Zweigen.

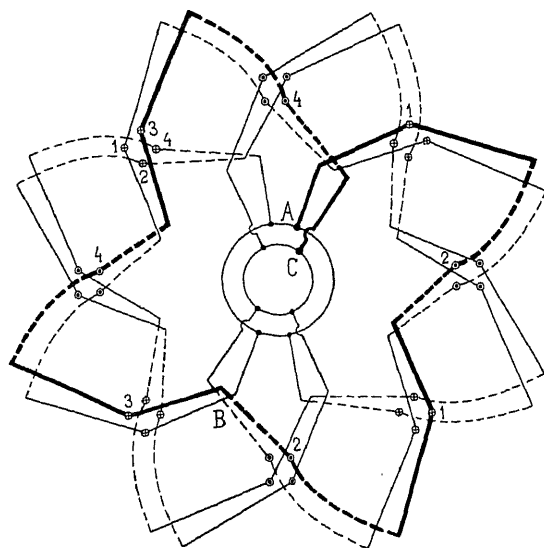



Fig. 148. Wellenwicklung mit vier Stäben pro Pol und vier parallelen Zweigen.

die Spulen der Gruppen 1, 2 und 3 gleichmäßig am Umfang verteilt, und damit die Querverbindungen zum Teil außen und zum Teil

innen liegen, haben die aufeinanderfolgenden Spulen einer Gruppe abwechselnd $2^1/_2$ und $3^1/_2$ Windungen oder 5 und 7 Stäbe.

Eine einfache umlaufende Wicklung mit zwei parallel geschalteten Hälften veranschaulicht Fig. 145. Die in den Stäben 1 und 2 induzierten EMK sind in der Phase entsprechend der Lochdistanz etwas verschieden, da aber jede Hälfte gleichviele Stäbe 1 und 2 besitzt, kann kein innerer Strom entstehen.

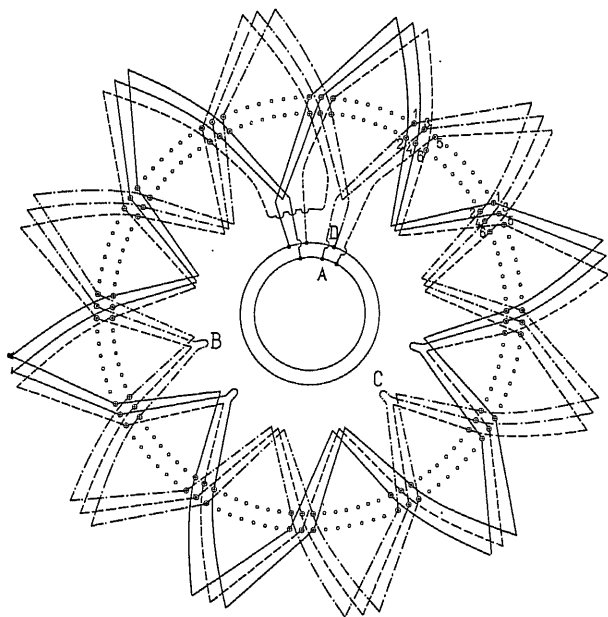



Fig. 149. Wellenwicklung mit sechs Stäben pro Pol und drei parallelen Zweigen.

Fig. 146 stellt eine Phase einer umlaufenden Dreilochwicklung dar, bei der die Stäbe in drei Gruppen parallel geschaltet sind. Die Wicklungsschritte müssen so ausgeführt werden, daß in jeder Gruppe die Stäbe 1, 2 und 3 in gleicher Anzahl vorhanden sind, im vorliegenden Fall enthält jede Gruppe von jeder Art 4 Stäbe. Um diese Bedingung erfüllen zu können, muß die Polzahl durch die Lochzahl pro Pol und Phase drei teilbar und die Polpaarzahl gerade sein.

Eine achtpolige Wicklung mit vier parallel geschalteten Gruppen stellt Fig. 147 dar. Jede Gruppe enthält je zwei von den Stäben 1, 2, 3 und 4.

Die Wicklung ist eine gemischte Wellen- und Schleifenwicklung, da wir nach 4 durchlaufenen Stäben wieder zum Ausgangspunkt zurückkehren. Die Wicklung läßt sich auch als reine

Wellenwicklung ausführen, wie Fig. 148 zeigt. Die Wicklungsschritte müssen so gewählt werden, daß jede Gruppe von den Stäben 1, 2, 3 und 4 eine gleiche Anzahl enthält. Gehen wir z. B. von A aus, so durchläuft man bis B die Stäbe 1 — 2 — 1 — 2, nun wird der Schritt geändert und man durchläuft bis C die vier Stäbe 3 — 4 — 3 — 4.

Ist die Stabzahl pro Pol und Phase gleich der parallel zu schaltenden Gruppen oder ein ganzes Vielfaches davon, so macht

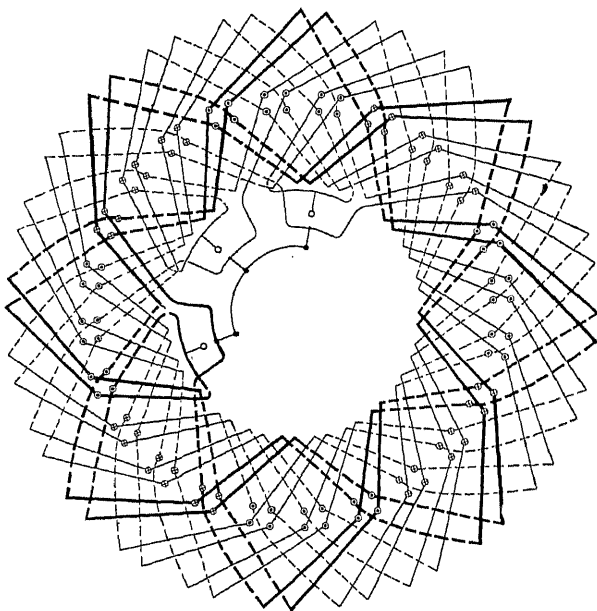



Fig. 150. Achtpolige Dreiphasenwicklung mit vier Stäben pro Pol und Phase. Wellenwicklung mit zwei parallelgeschalteten Zweigen.

die Wicklung jeder Gruppe im Schema eine ganze Zahl von Umgängen. Fig. 149 veranschaulicht ein solches Schema. Wir haben $6 = 2 \cdot 3$ Stäbe pro Pol und Phase, die in drei Gruppen parallel geschaltet sind. Da die Polzahl gleich 12 ist, haben wir $6 \times 12 = 72$ Stäbe pro Phase und 24 Stäbe in einer Gruppe. Damit jede Gruppe von den Stäben 1 bis 6, deren Lage im Feld und in den Nuten verschieden ist, eine gleiche Anzahl enthalten soll, muß der Schritt nach je $\frac{24}{3} = 8$ durchlaufenen Stäben geändert werden.

Für die Gruppe, welche bei A und D endigt, findet die Änderung des Schrittes bei B und C statt. Einer Gruppe entsprechen zwei Umgänge.

Das vollständige Schema einer Dreiphasenwicklung für 8 Pole und 4 Stäbe pro Pol und Phase mit je zwei parallel geschalteten Gruppen gibt Fig. 150. Es bedarf keiner weiteren Erläuterung, die Gruppen sind unter sich vollkommen symmetrisch.

Ist die Stabzahl pro Pol und Phase durch die Zahl der parallel zu schaltenden Gruppen nicht teilbar, so ist die Zahl der Umläufe einer Wicklungsgruppe keine ganze Zahl.

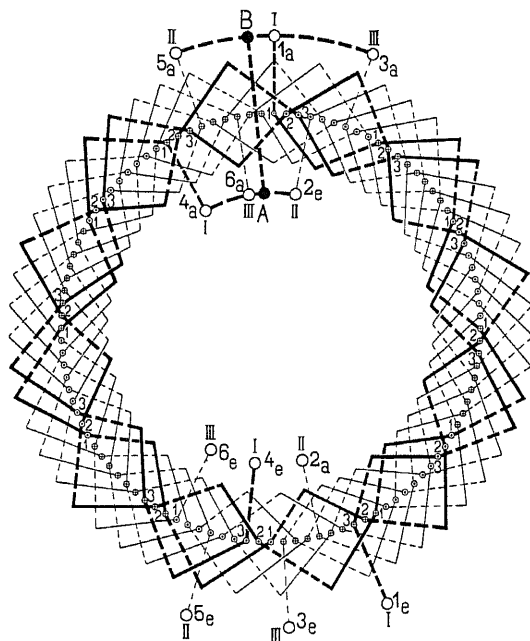



Fig. 151. Zwölfpolige Dreiphasenwicklung mit drei Stäben pro Pol und Phase. Wellenwicklung mit zwei parallelen Zweigen.

Fig. 151 stellt als Beispiel hierzu eine 12polige Dreiphasenwicklung mit 3 Stäben pro Pol und Phase, also mit 36 Stäben pro Phase dar, die in zwei Gruppen parallel geschaltet sind. Die Stäbe einer Gruppe machen $\frac{3}{2} = 1{,}5$ Umgänge. Die Wicklung ist so entworfen, daß jeder Gruppe eine gleiche Anzahl von den Stäben 1, 2 und 3 angehört und daß die Enden der Gruppen möglichst nahe zusammenfallen, so daß nur kurze Querverbindungen nötig werden. Die Enden 2_a, 2_e, 4_a, 4_e und 6_a, 6_e liegen auf der einen Seite und die Enden 1_a, 1_e, 3_a, 3_e und 5_a, 5_e auf der andern Seite der Wicklung. Für den neutralen Punkt der Sternschaltung ist eine über oder quer durch die Armatur gehende Verbindung *A*-*B* erforderlich.

Siebentes Kapitel.

Besondere Wicklungen für asynchrone Maschinen.

18. Gleichstromwicklungen mit verkürztem Schritt. — 19. Wicklungen für verschiedene Polzahlen. — 20. Rotorwicklungen.

Die bisher behandelten Wicklungen sind alle auch für die Statoren und Rotoren der asynchronen Maschinen anwendbar. Die Statoren werden namentlich bei Hochspannungsmaschinen meist mit Spulenwicklung, die Rotoren oft mit aufgeschnittenen Gleichstromwicklungen versehen. Eine Reihe von Wicklungen kommen dagegen nur für asynchrone Maschinen in Betracht. Diese sollen daher im folgenden besonders behandelt werden.

18. Gleichstromwicklungen mit verkürztem Schritt.

Um möglichst sinusförmige Feldkurven bei Zweiphasenmotoren zu bekommen, schlägt B. G. Lamme[1]) Gleichstromwicklungen mit verkürztem Wicklungsschritt vor. Eine derartige Wicklung ist in Fig. 152 dargestellt. Es ist eine zweiphasige Schleifenwicklung mit 32 Stäben. Setzt man in den Wicklungsformeln

$$y_1 = \frac{s - b}{2p} \pm 2\,, \qquad y_2 = \frac{s - b}{2p}$$

$b = 14$ ein, so erhält man die verkürzten Schritte

$$y_1 = \frac{32 - 14}{2} + 2 = 11 \text{ und } y_2 = \frac{32 - 14}{2} = 9\,.$$

In der Figur sind die Stromrichtungen für den Augenblick eingezeichnet, wo der Strom in der Phase I ein Maximum hat, während der der andern Phase gleich Null ist. Man sieht, daß an den Stellen des Umfangs, wo die Stromrichtung sich ändert und die

[1]) Engl. Patent 1898 No. 5064.

magneto-motorische Kraft also am größten ist, je zwei mit Null bezeichnete Nuten liegen, in denen die Stromrichtungen der Stäbe einander entgegengesetzt sind; diese bleiben also magnetisch un-

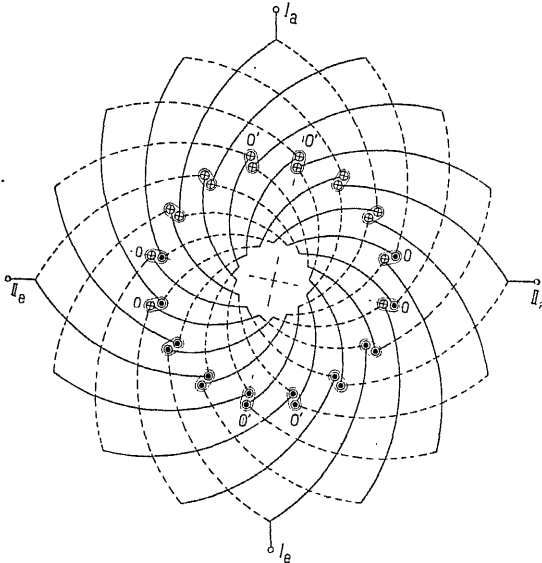



Fig. 152. Zweiphasige Schleifenwicklung mit verkürztem Schritt für asynchrone Motoren.

wirksam. Eine halbe Periode später, wo der Strom der zweiten Phase seinen Höchstwert hat, sind die um eine halbe Polteilung von den Nuten 0 entfernten Nuten 0′ magnetisch unwirksam. Das Feld dieser Wicklung soll später ausführlicher behandelt werden.

19. Wicklungen für verschiedene Polzahlen.

Die synchrone Tourenzahl n eines Wechselstrommotors bei der Periodenzahl c ist durch die Gleichung

$$n = \frac{60c}{p}$$

gegeben. Für konstante Periodenzahl ist sie umgekehrt proportional der Polzahl. Man kann also durch Änderung der Polzahl eine entsprechende Tourenregulierung erreichen.

Die Änderung der Polzahl wird durch Umschalten eines Teiles der Statorwicklung bewirkt, die zu diesem Zwecke besonders anzuordnen ist. Im folgenden sind eine Reihe derartiger Wicklungen beschrieben.

a) Einphasenwicklungen für verschiedene Polzahlen. Am einfachsten ist eine Veränderung der Polzahl bei Einphasenwicklungen zu erreichen. Die Wicklung wird jeweils in zwei Teile geteilt und zur Veränderung der Polzahl die Stromrichtung in einem Teile umgekehrt. Die im folgenden hierfür gegebenen Wicklungsschemas sollen nur das Prinzip der verschiedenen Polumschaltungen erläutern. Die angegebenen Anordnungen lassen sich natürlich für verschiedene Spulenzahlen anwenden und durch Aneinanderreihen mehrerer Schemas auf höhere Polzahlen ausdehnen.

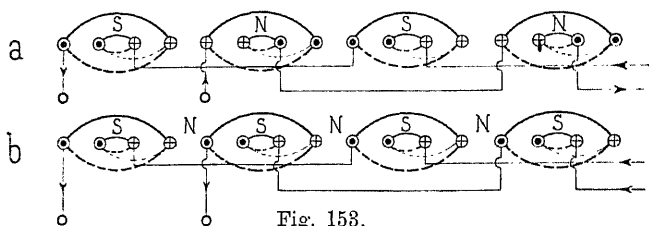



Fig. 153.

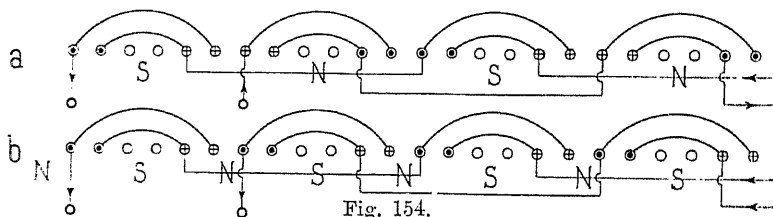



Fig. 154.

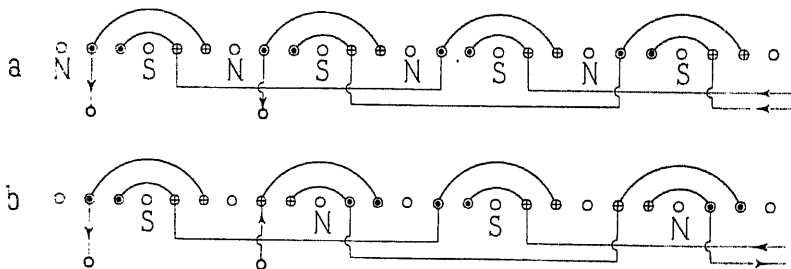



Fig. 155.

Fig. 153 bis 155. Einphasige Wicklung für Umschaltung von vier auf acht Pole.

Polumschaltung im Verhältnis 1 : 2. Eine Spulenwicklung für Polumschaltung im Verhältnis 1 : 2 von 4 auf 8 Pole ist in Fig. 153 gegeben. Die Wicklung besteht aus lauter gleichen Spulengruppen. Von diesen werden die erste und dritte und die zweite und vierte miteinander verbunden, so daß zwei Stromkreise entstehen.

Zur Polumschaltung wird die Stromrichtung in der zweiten und vierten Spulengruppe umgekehrt.

Man kann die Wicklung, bei der sämtliche Löcher am Umfange besetzt sind, entweder als vierpolige Wicklung nach der Art, wie sie in Fig. 59 dargestellt ist, betrachten oder sie als achtpolige nach dem Schema Fig. 58 ansehen. Sie ist also für beide Polzahlen gleichwertig. Soll jedoch, wie dies bei Einphasenmotoren öfters geschieht, nur ein Teil, z. B. $^2/_3$, der Löcher pro Pol bewickelt werden, so kann die Wicklung nur für eine Polzahl normal ausgeführt werden. Sie muß dann entweder, falls die Maschine hauptsächlich vierpolig laufen soll, nach Fig. 154 angeordnet werden, wo die unbewickelten Löcher an vier um die Polteilung der vier-

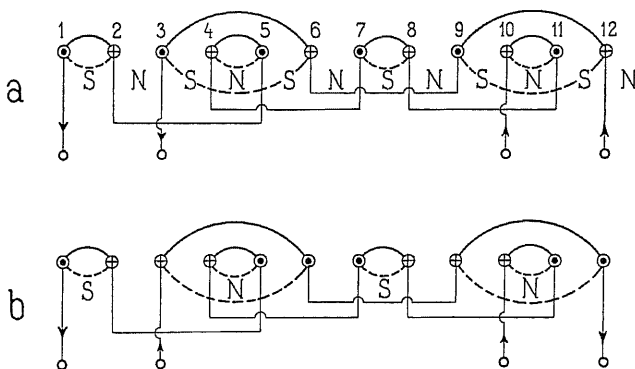



Fig. 156. Einphasige Wicklung für Umschaltung von vier auf zwölf Pole.

poligen Wicklung entfernten Stellen verteilt sind, oder sie wird, wie in Fig. 155, als normal achtpolige Armatur, die dem Schema Fig. 58 entspricht, gewickelt und es wird an acht Stellen des Umfanges je ein Loch frei gelassen.

Polumschaltung im Verhältnis 3 : 1. Um eine Veränderung der Polzahl im Verhältnis 3 : 1 zu erreichen, muß man die Wicklung aus langen und kurzen Spulen zusammensetzen, wie dies in Fig. 156 für eine 12- und 4-polige Wicklung schematisch dargestellt ist. Hier bedeutet jeder Kreis die Spulenseiten unter einem der 12 Pole. Numeriert man die Kreise mit 1 bis 12, so ist so zu wickeln, daß man vier kurze Spulengruppen, 1—2, 4—5, 7—8, 10—11, und zwei lange, 3—6 und 9—12, erhält. Die kurzen Spulen werden miteinander verbunden und ebenso die langen hintereinander geschaltet. Kehrt man den Strom in den langen Spulen um, so wird die Polzahl auf den dritten Teil herabgesetzt und man erhält in unserem Falle eine vierpolige Wicklung.

Polumschaltung im Verhältnis 2:3. Auch eine Änderung der Polzahl im Verhältnis 2 : 3 läßt sich durch passende Anordnung und Verbindung der Spulen erreichen. Diese Schaltung ist in den Figg. 157 und 158 für 4 bezw. 6 Pole gezeigt. Die Wicklung besteht aus gleichen gekreuzten Spulen, von denen wieder je eine Hälfte hintereinander geschaltet ist. Im Schema ist der eine Stromkreis stark, der andere schwach ausgezogen. Numeriert man die Spulenköpfe fortlaufend, so gehören die Spulen 1, 2, 3 zum einen und 4, 5, 6 zum andern Kreis. Durch Aneinanderreihen derartiger Schemas kann man Wicklungen für beliebige Vielfache von 4 und 6 Polen erhalten. Hier werden dann die Spulen 1, 2, 3 — 7, 8, 9 — 13, 14, 15 u. s. w. hintereinander geschaltet.

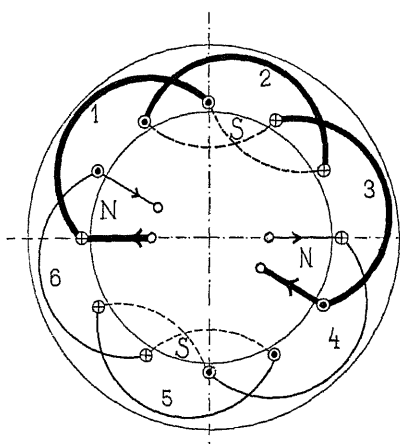
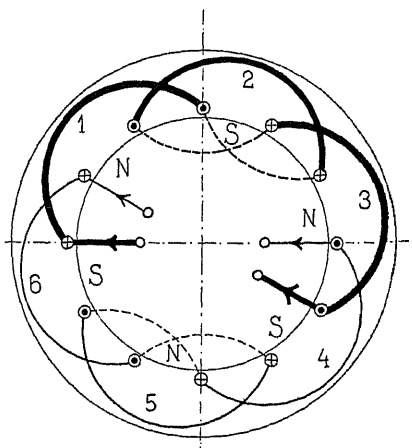



Fig. 157. Fig. 158.
Einphasige Wicklung für Umschaltung von vier auf sechs Pole.

Sämtliche im Vorhergehenden beschriebenen Wicklungen waren Spulenwicklungen. Die gleichen Prinzipien lassen sich natürlich ohne weiteres auch auf umlaufende Wicklungen anwenden, indem man die Stäbe nach den für die Spulenwicklungen angegebenen Schemas verbindet. Der Schritt auf der einen Seite der Armatur wird gleich lang wie die Spulenköpfe der Spulenwicklungen, der auf der anderen Seite gleich lang, wie die Verbindungen der einzelnen Spulen.

b) **Dreiphasenwicklungen für verschiedene Polzahlen.** Polumschaltung bei Ringwicklung. Eine beliebige Änderung der Polzahl läßt sich mit einer Dreiphasen-Ringwicklung erreichen. Am einfachsten wird die Umschaltung, wenn die Polzahlen im Verhältnis 1:2 stehen. Motoren mit einer derartigen Wicklung wurden

zuerst im Jahre 1893 nach Angaben von Dr. **Behn-Eschenburg** von der **Maschinenfabrik Örlikon** ausgeführt.

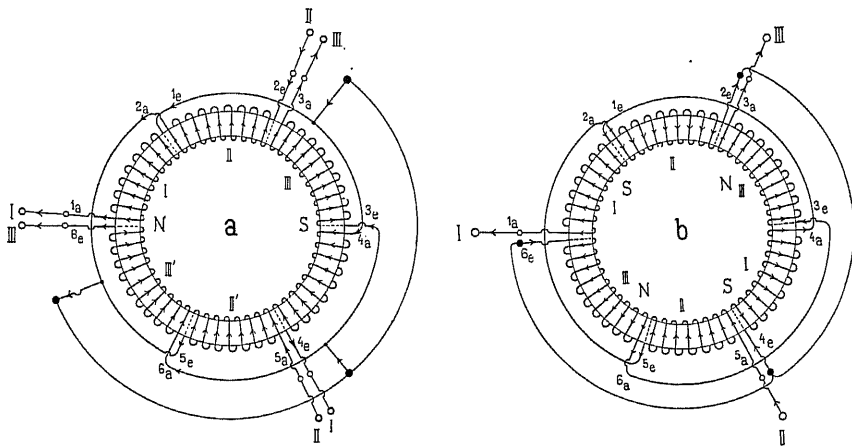



Fig. 159a und b. Ringwicklung für Polumschaltung von zwei auf vier Pole. Maschinenfabrik Örlikon.

Das Schema der Wicklung für zwei und vier Pole ist in Fig. 159a und b gegeben. Die Wicklung ist in sechs Teile geteilt, so daß jeder Phase zwei Teile entsprechen. Diese sind an einem Ende fest miteinander verbunden und werden entweder parallel

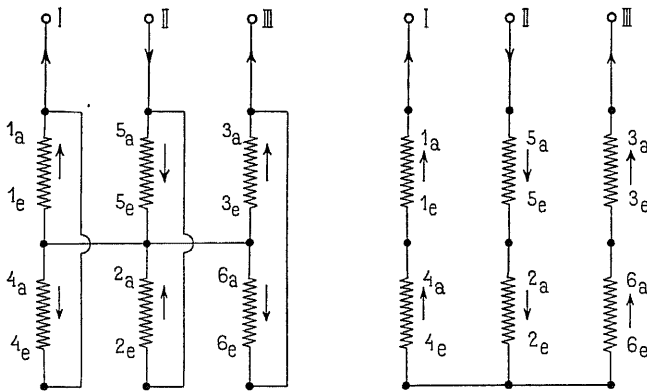



Fig. 160a und b. Verbindungsschema zu Fig. 159a und b.

oder hintereinander geschaltet. Bei Parallelschaltung (Fig. 159a) ergeben sich zwei Pole, bei Serienschaltung (Fig. 159b) vier Pole. Bei zweipoliger Schaltung haben je zwei am Umfange aufeinanderfolgende Spulen eine Phasendifferenz von 60^0 und bei vierpoligem Feld von 120^0.

Die beiden Schaltungen und der zugehörige Schalter sind in den Fig. 160a und b und 161 schematisch aufgezeichnet. Wie man sieht, bleibt bei der Polumschaltung die Stromrichtung in der einen Hälfte der Spulen unverändert, in der andern Hälfte wird sie umgekehrt. Der Übergang von Schaltanordnung, Fig. 160a zu Fig. 160b, wird bewirkt, indem der Schalter, Fig. 161 von a nach b, umgelegt wird.

Polumschaltung bei Trommelwicklung von Dahlander. Auch bei Trommelwicklung kann durch besondere Anordnung und Schaltung eine Veränderung der Polzahl erreicht werden. Eine

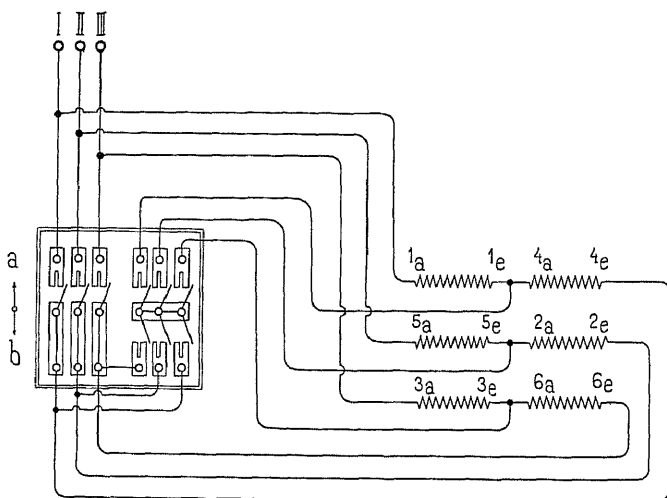



Fig. 161. Umschalter zu Wicklung Fig. 159a und b.

Wicklung zur Veränderung der Polzahl im Verhältnis 2 : 1 ist von R. Dahlander in E. T. Z. 1897 S. 257 angegeben worden.[1]) Die Wicklung wird, wie in Fig. 162 gezeigt ist, als normale Spulenwicklung für die höhere Polzahl ausgeführt, deren Spulen nach Schema Fig. 76 S. 46 gekreuzt sind. Die Hälfte der Spulen jeder Phase wird hintereinander geschaltet, und zwar überspringt man mit den Verbindungen, von einer Spule ausgehend, jeweils die folgende der gleichen Phase und geht zur nächstfolgenden, so daß längs des Umfangs die Spulen einer Phase abwechselnd dem einen und dem andern Stromkreise angehören. Die beiden Stromkreise jeder Phase werden, wie in Fig. 164 schematisch dargestellt ist, am einen Ende A_1, B_1, C_1 miteinander verbunden. Von den beiden frei bleibenden Enden wird das eine mit den entsprechenden Enden der anderen Phasen

[1]) D. R. P. 98417.

fest zu einem neutralen Punkte vereinigt. Das andere Ende, das in den Figuren mit A, B, C bezeichnet ist, wird bei der achtpoligen Schaltung (Fig. 162) zu einer der Stromzuführungsklemmen geführt; die beiden Stromkreise sind dann wie bei der Ringschaltung für die höhere Polzahl hintereinander geschaltet. Um auf die halbe Polzahl zu gelangen, werden die beiden Spulengruppen jeder Phase

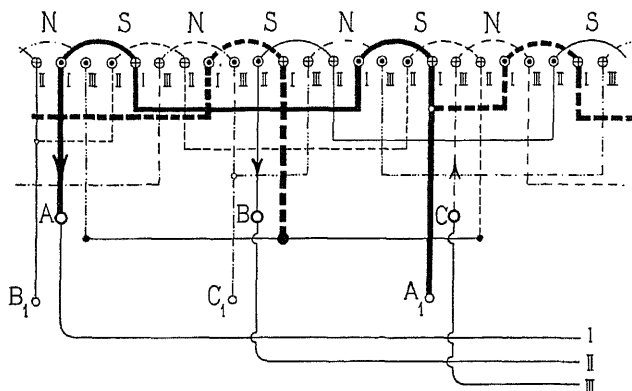



Fig. 162.

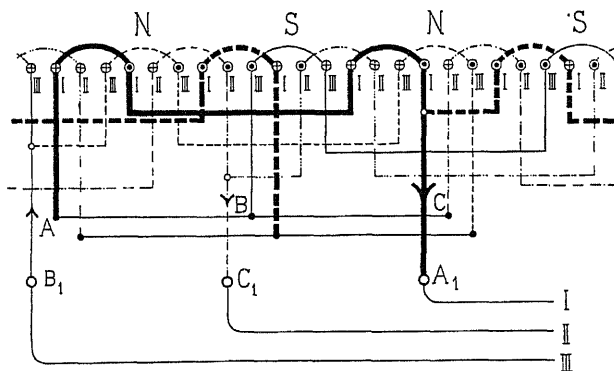



Fig. 163.

Fig. 162 und 163. Spulenwicklung von Dahlander für Polumschaltung von acht Polen auf vier Pole.

parallel geschaltet. Man erreicht dies nach Fig. 163 und 165 in einfacherer Weise, wie bei der Schaltung Fig. 160, indem man auch die Klemmen A, B, C zu einem neutralen Punkte vereinigt und die Stromzuführung an die Verbindungsstellen beider Spulengruppen A_1, B_1, C_1 anschließt. Die Parallelschaltung der Spulengruppen allein würde zwar die halbe Anzahl der Drehfelder ergeben, diese würden sich jedoch in entgegengesetzter Richtung drehen, wie die

der achtpoligen Schaltung. Man muß daher außerdem die zweite und dritte Phase vertauschen, um den richtigen Drehsinn zu erhalten.

Daß man durch die angegebene Umschaltung tatsächlich die halbe Zahl der Drehfelder erhält, wird durch die Fig. 166 und 167 erläutert, in denen der Verlauf der Ströme in den einzelnen Drähten während einer halben Periode für beide Schaltungen dargestellt ist. Die sieben Zeilen entsprechen sieben aufeinander folgenden Zeitpunkten, die in den Stromkurven Fig. 168 mit 1 bis 7 bezeichnet sind.

Fig. 166 gilt für die achtpolige Schaltung Fig. 162, es ist jedoch nur eine Hälfte der Drähte eingezeichnet. In Zeitpunkt 1

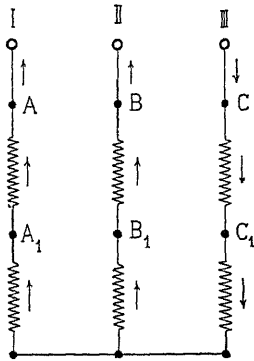
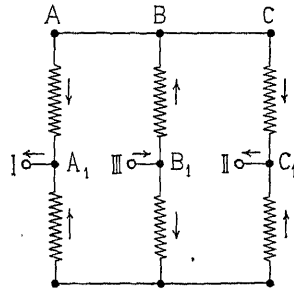



Fig. 164. Fig. 165.

Fig. 164 und 165. Schema der Verbindungen in den Fig. 162 und 163.

ist der Strom in der dritten Phase ein Maximum, während er in Phase I abnimmt und in Phase II wächst. Dieser Moment ist auch in Fig. 162 dargestellt. In Zeitpunkt 2 ist der Strom von Phase I zu Null geworden; in Zeitpunkt 3 hat er seine Richtung umgekehrt, während die Stromrichtung von Phase II und III unverändert ist. In den folgenden Zeitpunkten werden auch die Ströme der Phasen III und II zu Null und kehren ihre Richtung um. Die Stellung der Pole ist jeweils durch die Buchstaben *N* und *S* bezeichnet. Man kann aus dieser Darstellung das Fortschreiten des Drehfeldes am Umfange erkennen.

Fig. 167 stellt den Stromverlauf der Schaltung Fig. 163 dar. Man erhält diesen, wie in der vorhergehenden Figur, indem man den Strom der ersten Phase in Zeile 2, den der zweiten in Zeile 6 und den der dritten in Zeile 4 Null werden läßt und dann jeweils in der folgenden Zeile die Stromrichtung der betreffenden Phase

umkehrt. Die Stellung der Pole ist hier ebenso bezeichnet, wie in Fig. 166.

Wie man sieht, ist die Polzahl durch die Stromumkehr auf die Hälfte vermindert. Jedoch wirken hier nicht, wie bei dem Drehfeld Fig. 166, sämtliche Drähte jedes Pols in gleichem Sinne, sondern an den Stellen, wo sich gerade die Polmitten befinden, wirken zwei Drähte einander entgegen und nur die übrigen kommen voll zur Wirksamkeit.

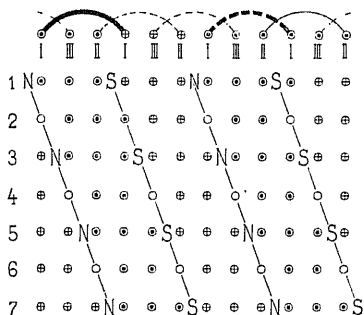
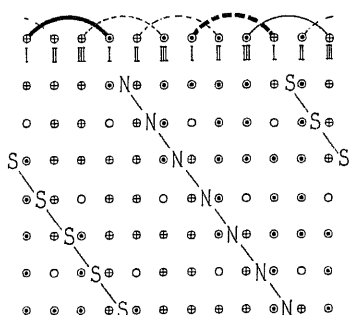



Fig. 166. Fig. 167.

Fig. 166 und 167. Schema des Stromverlaufes in der Wicklung Fig. 162 u. 163 während einer halben Periode.

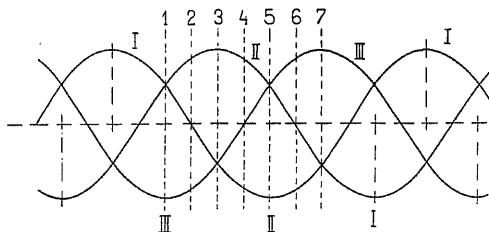



Fig. 168.

Um durch die Umschaltung die durch die Fig. 166 bis 167 erläuterte Wirkung zu erzielen, ist es notwendig, daß die Spulenköpfe in der in Fig. 162 gezeichneten Weise gekreuzt sind. Bei in gleicher Richtung am Umfange abgebogenen Köpfen (Fig. 169) ist die Veränderung der Polzahl durch keinerlei Umschaltung zu erreichen. Die Drehfelder der kleineren Polzahl verschwinden hier nämlich, wenn ihre Mittellinie, wie in Fig. 169, durch die Strichpunktierte Linie angedeutet ist, zwischen zwei Spulengruppen zu liegen kommt, da der mittlere Kraftlinienweg außerhalb der Spulen verläuft.

Man kann die Wicklung von Dahlander auch als Schleifenstabwicklung nach Fig. 170 ausführen. Die Stäbe in jeder Nut

sind hier nach der gleichen Richtung abgebogen. Die Wicklung muß daher als Stirnwicklung ausgeführt werden. Man kann die Wicklung als Gleichstromschleifenwicklung ansehen, bei der die Hälfte aller Stäbe weggenommen ist.

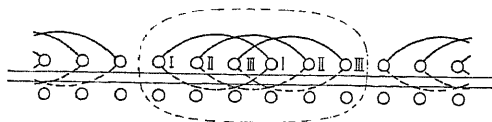



Fig. 169.

Will man die vielen äußeren Verbindungen vermeiden, so kann man die Wicklung auch als umlaufende Wicklung ausführen. Hier muß dann der Schritt auf der einen Seite der Armatur gleich der

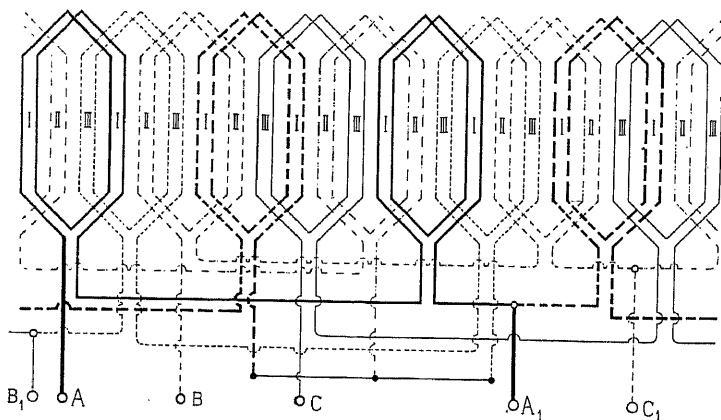



Fig. 170. Spulenstabwicklung für Polumschaltung acht auf vier Pole nach Dahlander.

Teilung τ für die höhere Polzahl und der auf der andern Seite gleich 3τ sein.

Da die Spulenweite bei der Dahlanderschen Wicklung der größeren Polzahl angepaßt ist, arbeitet die Wicklung zwar für diese Polzahl günstig, bei der kleineren Polzahl ergibt sie jedoch eine ungünstige Kurvenform.

Gleichstromwicklungen mit verkürztem Schritt für verschiedene Polzahlen. Eine Wicklung, bei der sich für beide Polzahlen annähernd gleich günstige Verhältnisse erzielen lassen, ist in letzter Zeit der Maschinenfabrik Örlikon patentiert worden.[1]) Hier wird für die Spulenweite eine Länge, die

[1]) D.R.P. 138854.

zwischen der größeren und kleineren Polteilung liegt, gewählt.

Die Wicklung wird zu diesem Zwecke als Gleichstromschleifenwicklung mit (für die größere Polzahl) verlängertem oder (für die kleinere Polzahl) verkürztem Schritte ausgeführt. Die Wicklungsformel lautet ähnlich der Formel 1 S. 65

$$y_1 = \frac{s + b}{k} + 2; \qquad y_2 = \frac{s + b}{k} \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

wobei unter k eine Zahl verstanden ist, die zwischen der größeren und kleineren Polzahl liegt. Die beiden Polzahlen können zu einander in beliebigem Verhältnis stehen.

Soll die Wicklung für beide Polzahlen annähernd gleich geeignet sein, so wird für k das Mittel zwischen beiden Polzahlen gewählt, und die Schritte entsprechen dann bei Polumschaltung im Verhältnis 1 : 2 ca. $^4/_3$ der kleineren Polteilung τ. Andernfalls kann die Wicklung mehr der einen oder der andern Polzahl angepaßt werden, je nachdem k näher bei der einen oder andern Polzahl angenommen wird.

In den Fig. 171 und 172 ist eine derartige Wicklung mit 96 Stäben für 4 oder 8 Pole aufgezeichnet. k ist gleich 6 gewählt; es wird also

$$y_1 = \frac{s + b}{k} + 2 = \frac{96 - 6}{6} + 2 = 17$$

$$y_2 = \frac{s + b}{k} = \frac{96 - 6}{6} = 15.$$

Die Wicklung ist eine unveränderte Parallelschaltung und es werden jeweils die unter den einzelnen Polpaaren liegenden Spulengruppen jeder Phase parallel geschaltet. Die Wicklung ist zu diesem Zwecke, wie auf S. 72 für diese Schaltung angegeben ist, für jede Polzahl in $p \cdot m$ gleiche Teile zu teilen, von deren Teilpunkten Abzweigungen zu den Stromzuführungsklemmen ausgehen. Stehen, wie im vorliegenden Falle, die beiden Polzahlen im Verhältnis 1 : 2, so fallen die sich für die kleinere Polzahl ergebenden Ableitungen, mit denjenigen für die größere Polzahl zusammen und man erhält allgemein $p_h \cdot m$ Ableitungen, wo p_h die höhere Polpaarzahl bedeutet.

Für die Wicklung Fig. 171 und 172 ergeben sich demnach $p_h \cdot m = 4 \cdot 3 = 12$ Abzweigungen.

Bei der vierpoligen Schaltung Fig. 171 wird der Strom bei den Klemmen A, B, C, die in der Figur durch starke Kreise an-

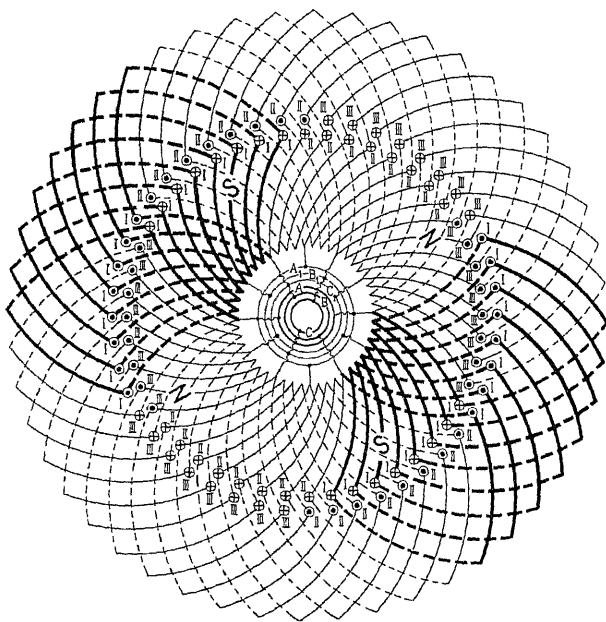



Fig. 171.

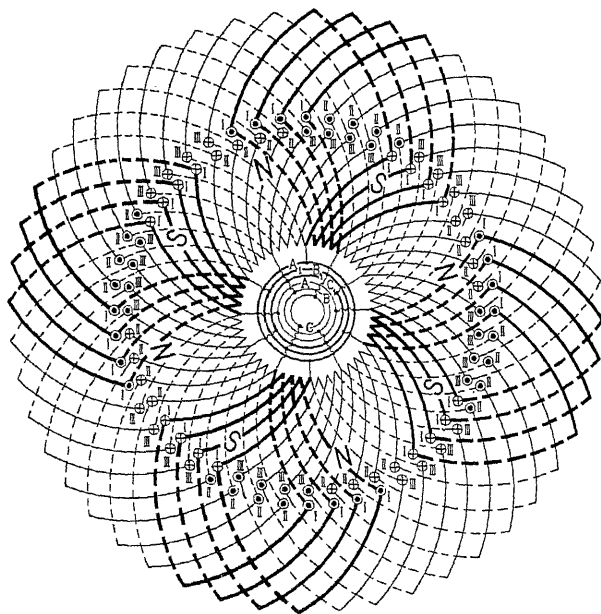



Fig. 172.

Fig. 171 und 172. Schleifenwicklung mit verkürztem Schritt für Polumschaltung von vier Polen auf acht Pole. (Maschinenfabrik Örlikon.)

gedeutet sind, eingeleitet und es führen pro Phase $p_n = 2$ um $\frac{s}{2 p_n} = \frac{96}{4} = 24$ Knotenpunktsteilungen voneinander entfernte Ableitungen Strom (p_n = niedere Polpaarzahl). Bei der achtpoligen Schaltung, Fig. 172, sind die Ringe A_1, B_1, C_1, die hier durch starke Kreise hervorgehoben sind, an die Stromzuführung angeschlossen und es führen pro Phase $p_h = 4$ um $\frac{s}{2 p_h} = \frac{96}{8} = 12$ Knotenpunktsteilungen entfernte Abzweigungen Strom. Die Reihenfolge der Phasen in den am Umfange aufeinanderfolgenden Abzweigstellen ist in beiden Fällen dieselbe.

Das DRP. 138854 der Maschinenfabrik Örlikon bezieht sich nur auf Schleifenwicklungen, man kann jedoch, wie Fig. 173 und 174 zeigt, die Wicklung für Polumschaltung auch als Wellenwicklung ausführen. Man macht in diesem Falle den resultierenden Schritt gleich der doppelten Polteilung ($= 2T$) der kleineren Polzahl. Die Schritte y_1 und y_2 werden ungleich; der Schritt y_1 wird verkürzt, y_2 wird verlängert. Je kleiner man y_1 wählt desto mehr nähert man sich den für die kleinere Polzahl günstigsten Verhältnissen. Bei einem Schritt

$$y_1 = \frac{2}{3} T = \frac{4}{3} \tau = \frac{1}{3} (y_1 + y_2) \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

arbeitet die Wicklung für beide Polzahlen annähernd gleich günstig (τ = Polteilung für die größere Polzahl).

Die Wicklung Fig. 173 und 174 hat wie die vorher behandelte Schleifenwicklung 96 Stäbe und ist von vier auf acht Pole umschaltbar. Da für 96 Stäbe eine unveränderte Reihenschaltung nicht ausführbar ist, ist die Wicklung als abgeänderte Reihenschaltung mit zwei zugefügten Stäben (siehe S. 100) ausgeführt. Der resultierende Schritt berechnet sich nach Gl. 11 zu

$$y_1 + y_2 = \frac{s}{p_n} = \frac{96}{2} = 48.$$

Wir wählen

$$y_1 \cong \frac{1}{3} (y_1 + y_2) = 17$$

$$y_2 = 48 - 17 = 31.$$

Für die vierpolige Schaltung Fig. 173 wird die Wicklung, wie eine normale Reihenschaltung für drei Phasen, in $m \cdot a = 3 \cdot 1$ Teile geteilt, und man erhält drei Ableitungen A, B, C, die an die Stromzuführungsklemmen anzuschließen sind. Für acht Pole (Fig. 174) wird die Wicklung in $2 a \cdot m = 6$ Teile geteilt, so daß jeder Teil

$\frac{96}{6} = 16$ Stäbe enthält, und es werden je zwei Teile, deren Stäbe um die doppelte Polteilung für die größere Polzahl 2τ voneinander entfernt sind, parallel geschaltet. Zu den Abzweigungen A, B, C kommen noch die Abzweigungen A_1, B_1, C_1, hinzu. Die Phasen folgen wieder am Umfange in gleicher Reihenfolge wie bei der vierpoligen Schaltung. Man erhält demnach bei der geschlossenen

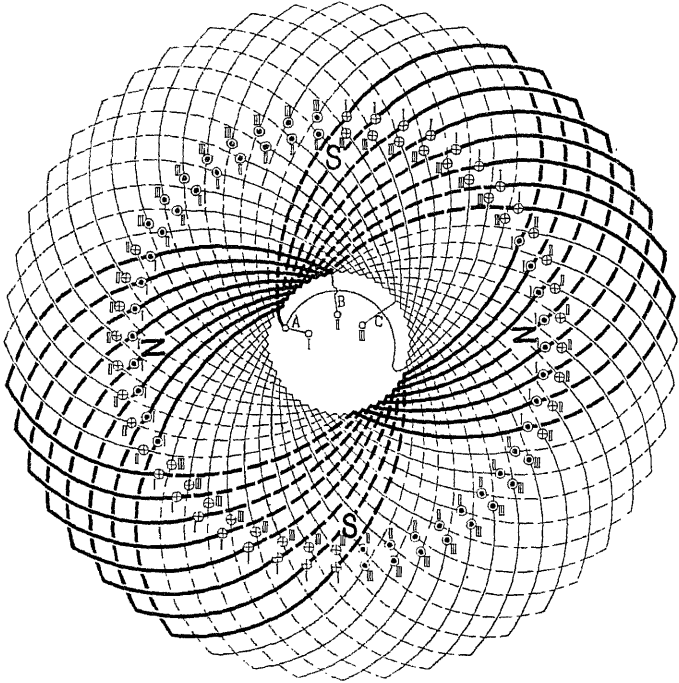



Fig. 173. Wellenwicklung mit verkürztem Schritt für Polumschaltung von vier Polen auf acht Pole.

Reihenwicklung für zwei verschiedene Polzahlen stets $2ma$ Abzweigungen, von denen jedoch bei der niederen Polzahl nur die Hälfte an die Stromzuführung angeschlossen wird.

Bei der bisher beschriebenen Ausführung der Wicklungen für Polumschaltung als unaufgeschnittene Gleichstromwicklungen sind für die niedere Polzahl doppelt soviel Windungen pro Phase in Serie geschaltet, als bei der höheren. Die Windungszahlen verhalten sich also umgekehrt wie die Polzahlen. Nach Angaben der Maschinenfabrik Örlikon erhält man in diesem Falle die günstigsten Betriebsverhältnisse, wenn die Klemmen-

spannungen für die verschiedenen Polzahlen sich umgekehrt verhalten, wie diese Polzahlen. Die Maschinenfabrik Örlikon verändert daher in einem Transformator die Spannung für die eine Polzahl in dem angegebenen Verhältnis.

Schneidet man die Wicklung auf, so kann man es durch passende Verbindung der einzelnen Teile erreichen, daß man für beide Polzahlen gleichviel hintereinander geschaltete Windungen

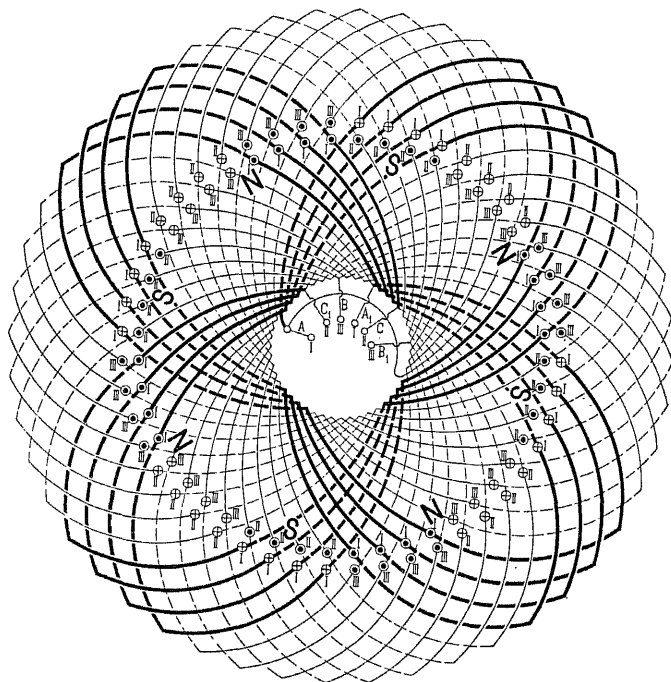



Fig. 174. Wellenwicklung mit verkürztem Schritt für Polumschaltung von vier Polen auf acht Pole.

erhält. In Fig. 175a und b sind die sechs Teile der Wicklung Fig. 173 und 174 und ihre Verbindung schematisch aufgezeichnet.

Die Anfänge und Enden der einzelnen Teile sind mit $1_a - 1_e$, $2_a - 2_e$ u. s. w. bezeichnet. Für die niedere Polzahl wird der Strom an drei, für die höhere an sechs Stellen zugeführt und es ergeben sich in den einzelnen Spulengruppen die in der Figur eingeschriebenen Phasen. Schneidet man die Wicklung auf und verbindet sie in der in Fig. 176a und b angegebenen Weise, so kann man, wie die Figur zeigt, allein durch Verlegung der drei Stromzuleitungen von den Punkten A, B, C nach A_1, B_1, C_1 dieselbe

Phasenvertauschung in den sechs Spulengruppen erzielen. Die Zahl der in Serie geschalteten Windungen pro Phase bleibt dabei für beide Polzahlen die gleiche.

Eine Wellenwicklung für sechs und zwölf Pole, die auf diese Art geschaltet ist, ist in den Fig. 177 u. 178 aufgezeichnet. Die Wicklung enthält wie die im vorhergehenden beschriebenen Wicklungs-

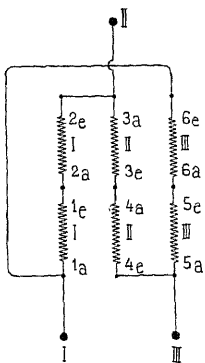
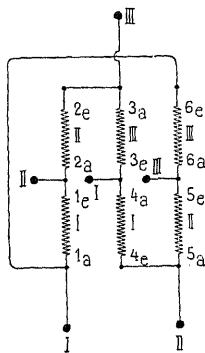



Fig. 175a und b. Schema der Verbindungen und Phasen für die Wicklung Fig. 173 und 174. Fig. 175a vier Pole. Fig. 175b acht Pole.

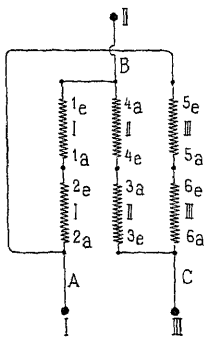
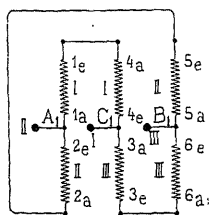



Fig. 176a und b. Polumschaltung bei einer aufgeschnittenen Wicklung durch Verlegung der Zuführungsklemmen.

beispiele für vier und acht Pole 96 Stäbe in 48 Nuten. Sie kann also in den gleichen Nuten untergebracht werden wie diese. Indem man die Armatur mit zwei Wicklungen für vier und acht und für sechs und zwölf Pole versieht, erhält man einen Motor, dessen Tourenzahl in sehr weiten Grenzen reguliert werden kann. Die Wicklung ist als abgeänderte Reihenschaltung ausgeführt, da eine

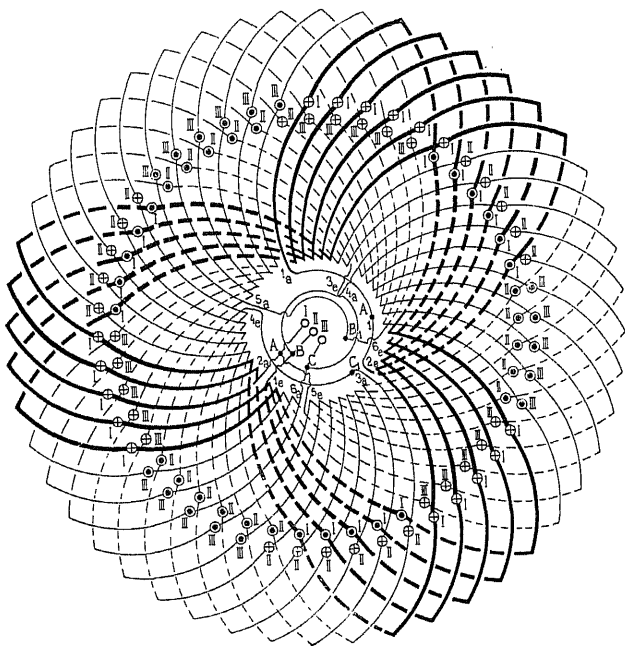



Fig. 177.

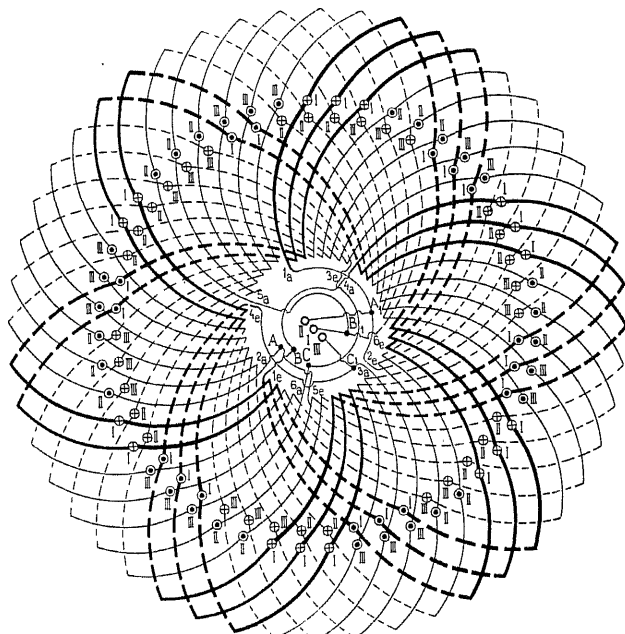



Fig. 178.

Fig. 177 und 178. Aufgeschnittene Wellenwicklung mit verkürztem Schritt für Polumschaltung von sechs Polen (Fig. 177) auf zwölf Pole (Fig. 178).

sechspolige unveränderte Reihenschaltung nicht mit 96 Stäben ausgeführt werden kann. Man erhält die Wicklungsschritte

$$y_1 + y_2 = \frac{s}{p_n} = \frac{96}{3} = 32$$

$$y_1 \simeq \frac{1}{3}(y_1 + y_2) = 11\,, \quad y_2 = 32 - 11 = 21\,.$$

Die Wicklung ist in sechs Teile geteilt und an den Teilpunkten aufgeschnitten. Die Anfänge und Enden der Teile sind mit $1_a - 1_e$, $2_a - 2_e$ u. s. f. bezeichnet und nach dem Schema Fig. 176 miteinander verbunden. Da die Stabzahl pro Pol und Phase keine

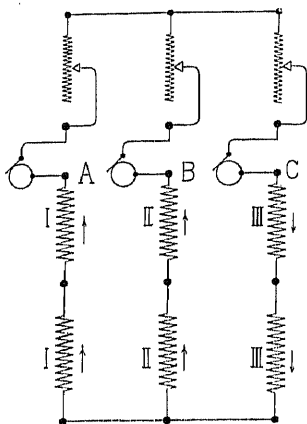
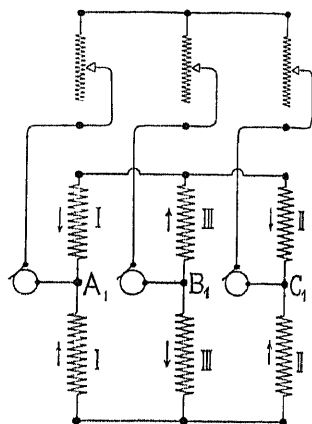



Fig. 179. Fig. 180.

Fig. 179 und 180. Verbindungsschema einer Rotorwicklung nach Dahlander für Polumschaltung bei Anwendung von sechs Schleifringen. Fig. 179 Höhere Polzahl. Fig. 180 Niedere Polzahl.

ganze Zahl ist, liegen die Schnittpunkte rings am Umfange zerstreut. Bei Einleitung des Stromes in A, B, C (Fig. 177) ergeben sich sechs Pole, bei Zuleitung zu A_1, B_1, C_1 zwölf Pole (Fig. 178).

Will man diese Schaltung mit je drei Anschlußpunkten und gleicher Windungszahl für beide Polzahlen bei den oben beschriebenen Schleifenwicklungen anwenden, so ist die Wicklung in $6\,p_n$ Teile zu teilen und es sind je p_n von diesen zu einer Spulengruppe hintereinander zu schalten. Es bildet dann der erste, siebente, dreizehnte u. s. w. Teil die erste Gruppe, der zweite, achte, vierzehnte u. s. w. Teil die zweite Gruppe u. s. f. Um die richtige Reihenfolge der Verbindungen der einzelnen Gruppen zu erhalten, geht man am besten so vor, daß man an irgend einem Schnittpunkt, den man mit 1_a bezeichnet, beginnend die erste

Spulengruppe durchläuft bis 1_e; das benachbarte Ende bezeichnet man mit 2_a und durchläuft die betreffende Gruppe bis 2_e. Dann beginnt man wieder bei dem daneben liegenden Teilpunkt mit 3_a u. s. f. Die Verbindung der einzelnen Gruppen wird nach dem Schema Fig. 176 ausgeführt. Die Maschinenfabrik Örlikon, der diese Schaltung patentiert ist[1]), gibt an, daß bei ihr der Leerlaufstrom für die niedrige Polzahl bedeutend kleiner ist als für die höhere, und daß die Zugkraft für die höhere Polzahl größer ist als für die niedrige.

Rotorwicklungen für verschiedene Polzahlen. Als Rotorwicklung benutzt man für die Motoren, die mit verschiedenen

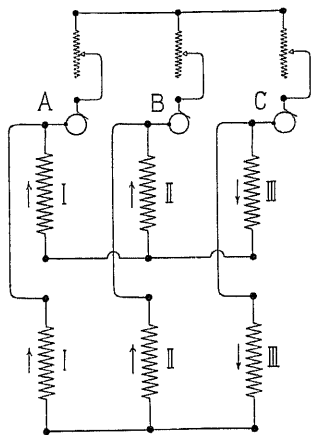
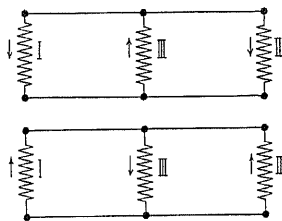



Fig. 181. Fig. 182.

Fig. 181 und 182. Verbindungsschema einer Rotorwicklung nach Dahlander für Polumschaltung bei Anwendung von drei Schleifringen. Fig. 181 höhere Polzahl. Fig. 182 niedere Polzahl.

Polzahlen arbeiten, meist eine Käfigwicklung, da diese von der Polzahl unabhängig ist. Man kann jedoch, um ein größeres Anlaufmoment zu erhalten, die Rotoren auch mit Phasenwicklung versehen und beim Anlassen Widerstände in den Rotorkreis einschalten. Man versieht dann entweder den Rotor mit zwei Wicklungen, von denen jede einer Polzahl entspricht oder man kann auch irgend eine von den im vorhergehenden beschriebenen Dreiphasenwicklungen für Polumschaltung als Rotorwicklung anwenden.

Bei der Wicklung von Dahlander werden die Punkte der Wicklung A, B, C und A_1, B_1, C_1, die bei der Statorwicklung mit den Stromzuführungsklemmen verbunden waren, zu Schleif-

[1]) D.R.P. 147427 der Maschinenfabrik Örlikon.